

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра ТЭС

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Е. А. Бойко
подпись инициалы, фамилия
« ____ » июня 2017 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код – наименование направления

Проект реконструкции Красноярской ТЭЦ-2

тема

Руководитель _____
подпись, дата

доцент, к.т.н.
должность, ученая степень

П.В. Шишмарев
инициалы, фамилия

Выпускник _____
подпись, дата

С.Г. Запрудский
инициалы, фамилия

Технический контроль _____
подпись, дата

С.А. Михайленко
инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____
подпись, дата

П. В. Шишмарев
инициалы, фамилия

Красноярск 2017

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Проект реконструкции Красноярской ТЭЦ-2» содержит 57 страниц текстового документа, 8 использованных источников, 5 листов графического материала.

ТЕПЛОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, КОТЕЛ, ТОПКА, ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА УГЛЯ, ОКСИДЫ АЗОТА, ШЛАКОВАНИЕ.

В данной выпускной квалификационной работе представлен проект реконструкции Красноярской ТЭЦ-2.

Целью реконструкции Красноярской ТЭЦ-2 является снижение выбросов оксидов азота и снижение шлакования поверхностей нагрева котла БКЗ-500.

В результате проведения расчетов установлено, что применение термической подготовки топлива позволяет создать высокоэкономичный экологически чистый котельный агрегат. Внедрение таких котлов позволит решить одновременно вопросы энергосбережения, экологии и экономичности работы тепловых электростанций.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 6 |
| 1 Общие сведения..... | 7 |
| 1.1 Технологические способы подавления оксидов азота | 7 |
| 1.2 Шлакование и загрязнение поверхностей нагрева котельных агрегатов при сжигании канско-ачинских углей | 8 |
| 2 Расчетная часть | 9 |
| 2.1 Подготовка данных к расчету котельного агрегата БКЗ-500 | 9 |
| 2.2 Объемы теоретического количества воздуха и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$ | 10 |
| 2.3 Действительные объемы продуктов сгорания по газоходам при коэффициенте избытка воздуха больше единицы | 12 |
| 2.4 Энтальпия продуктов сгорания по газоходам..... | 13 |
| 2.5 Позонный расчет топочной камеры при газовой сушке топлива после реконструкции | 14 |
| 2.5.1 Расчет II зоны (зона максимального тепловыделения)..... | 15 |
| 2.5.2 Расчет III (выходной)зоны (от сопел третичного дутья до выходного окна) | 20 |
| 3 Расчет камеры термоподготовки | 22 |
| 3.1 Тепловой расчет камер термоподготовки | 22 |
| 3.2 Аэродинамический расчет камер термоподготовки | 27 |
| 3.3 Гидравлический расчет контура циркуляции камеры термоподготовки | 29 |
| 4 Охрана окружающей среды..... | 42 |
| 4.1 Расчет выбросов оксидов азота на котле БКЗ-500 с прямоточными горелками | 43 |
| 4.2 Расчет выбросов оксидов азота на котле БКЗ-500 с камерами термоподготовки | 46 |
| 5 Экономическая часть | 47 |
| 5.1 Расчет экологических платежей за выбросы оксида азота на котле с прямоточными горелками | 47 |
| 5.2 Расчет экологических платежей за выбросы оксида азота на котле с камерами термоподготовки | 49 |
| 5.3 Оценка экономической эффективности капитальных вложений | 50 |
| 6 Безопасность проектируемого объекта | 51 |
| 6.1 Общая характеристика проектируемого объекта с точки зрения безопасности и безвредных условий труда | 51 |
| 6.2 Микроклимат производственных помещений | 52 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.3 | Освещение | 53 |
| 6.4 | Шум, ультразвук и инфразвук | 53 |
| 6.5 | Вибрация | 54 |
| | Заключение | 56 |
| | Список использованных источников | 57 |

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Экологической стратегии развития России до 2030 года, экологическая ситуация в Российской Федерации характеризуется высоким уровнем антропогенного воздействия на окружающую среду и значительными экологическими последствиями прошлой экономической деятельности. В связи с острой необходимостью срочных изменений подходов к обеспечению качества окружающей среды и сохранению здоровья населения в нашей стране с 2014 года активно разрабатываются и вводятся в действие новое природоохранное законодательство и многочисленные экологоориентированные нормативно-правовые акты, внедряющие новые механизмы управления охраной окружающей среды.

Как известно, топливно-энергетический комплекс (ТЭК) относится к отраслям с наибольшим негативным воздействием на окружающую среду. Поэтому Постановлением Правительства РФ к I категории отнесены, в частности, предприятия (объекты) ТЭК "по обеспечению электрической энергией, газом и паром с использованием оборудования с установленной электрической мощностью 250 МВт и более при потреблении в качестве основного твердого и (или) жидкого топлива или с установленной электрической мощностью 500 МВт и более при потреблении в качестве основного газообразного топлива", т.е. все крупные тепловые электростанции.

Рассматриваемое в данной работе техническое предложение, основанное на внутритопочной термической подготовке угля с организацией ступенчатого сжигания применительно для котла БКЗ-500-140.

1 Общие сведения

Канско-Ачинский угольный бассейн – безусловный лидер по запасам и качеству угля и основа энергетической безопасности России. Канско - ачинские угли характеризуются умеренной влажностью – до 38%, низкой зольностью (в основном менее 12%), низким содержанием серы (в основном менее 0,5%) и азота (менее 1%), что определяет их благоприятные характеристики для энергетики. Отличительной особенностью минерального состава золы является содержание оксида кальция, особенно у березовских углей (до 60%), и то, что соотношение основных и кислых оксидов золы существенно изменяется при небольшом изменении зольности, соответственно изменяя шлакующие свойства золы угля и плавкостные характеристики шлака. Особенно это заметно на углях Бородинского и Березовского разрезов, являющихся основными поставщиками энергетических углей.

Развитие горных работ, освоение новой техники, повышение квалификации кадров дали разрезу «Бородинский» статус крупнейшего в России. Высокопроизводительные роторные комплексы, карьерные локомотивы, современная вспомогательная техника, развитая ремонтная база позволяют бородинским угольщикам добывать более 20 млн тонн угля в год. Наличие крупных разведанных запасов угля создают уникальные условия для добычи в широких масштабах. В зимнее время объем отгрузки доходит до тысячи вагонов в сутки. Предприятие является основным поставщиком топлива для нужд энергетики и жилищно-коммунального хозяйства в Красноярском крае. Бородинский уголь также востребован в Хабаровском и Алтайском краях, Иркутской и Амурской областях, Республиках Бурятия и Хакасия, в Венгрии и Словакии.

В связи с возрастающей ролью углей Канско-Ачинского бассейна (догрузкой и наращиванием производственных мощностей) в развитии энергетики России на первый план выдвигаются проблема, связанная с эффективным энергетическим использованием углей этого бассейна.

К основным аспектам этой проблемы следует отнести:

а) Существенное снижение выбросов оксидов азота с уходящими дымовыми газами на тепловых электростанциях.

б) Уменьшение загрязнения и шлакования котельных агрегатов, что обусловлено специфическим составом минеральной части канско-ачинских углей, в связи с чем котельные агрегаты не могут нести номинальную нагрузку.

В связи с этим проводится анализ и расчет по реконструкции котла БКЗ-500-140 ст. №6 Красноярской ТЭЦ-2.

1.1 Технологические способы подавления оксидов азота

В настоящее время энергетика является ведущей отраслью современного общества. Объекты энергетики, как и многие предприятия других отраслей промышленности, представляют источники неизбежного, потенциального, до

настоящего времени практически количественно не учитываемого риска для населения и окружающей среды.

Среди газовых выбросов оксиды азота являются наиболее вредными отравляющими веществами, образование которых происходит в зоне горения всех топлив по известным механизмам [1]:

а) термическому, в результате диссоциации молекул на атомы и радикалы и последующего окисления молекул азота; исходит из значительной зависимости выхода NO от температуры;

б) «быстрому», действующему в начале зоны горения, в основу которого положены реакции с участием радикалов CH, CH₂, определяет минимальный выход NO при горении топлива, слабо зависит от температуры и сильно от структуры молекулы топлива;

в) «топливному», зависящему от содержания азота в топливе и избытка воздуха в топочной камере.

Все современные технологии, связанные с подавлением выбросов оксидов азота с уходящими дымовыми газами на ТЭС можно разделить на химические и технологические.

Химические методы заключаются в очистке газов от NO_x уже на выходе из котлоагрегатов. Такие методы являются очень дорогостоящими и находят в РФ ограниченное применение.

Технологические способы снижения выбросов оксидов азота в дымовых газах: многоступенчатое сжигание, концентрическое сжигание, подача воды или пара в зону горения, сжигание топлив в кипящем слое и др.

1.2 Шлакование и загрязнение поверхностей нагрева котельных агрегатов при сжигании канско-ачинских углей

На протяжении нескольких десятилетий освоение канско-ачинских углей остается актуальной проблемой топливно-энергетического комплекса (ТЭК) страны. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. отводит Канско-Ачинскому бассейну наряду с Кузбассом статус федерального значения в обеспечении энергетической безопасности и социально-экономического развития страны ее регионов. При всех сценариях реформирования и модернизации ТЭК роль углей Канско-Ачинского бассейна будет непрерывно возрастать. Прежде всего, это определяется уникальностью угольного бассейна, заключающейся в сочетании колоссальных запасов, удобного географического положения угленосных площадей, благоприятных горно-геологических условий залегания и строения угольных пластов, кондиционных свойств угля, в том числе с учетом потенциальных выбросов в окружающую среду, что создает предпосылки получения одного из самых дешевых натуральных топлив.

Многолетний опыт эксплуатации котельных агрегатов, работающих на канско-ачинских углях, показал, что происходит интенсивное шлакование топочных экранных и загрязнение конвективных поверхностей нагрева. Повышенное содержание кальция в минеральной части канско-ачинского угля приводит при его сжигании к образованию в летучей золе больших количеств

свободного оксида кальция. Поэтому даже незначительное присутствие в дымовых газах оксидов серы приводит к образованию прочных сульфатносвязанных отложений.

По этой причине котельные агрегаты, работающие на углях канско-ачинского бассейна не могут нести номинальной нагрузки, а это в свою очередь приводит к недовыработке электрической и тепловой энергии, увеличению затрат на собственные нужды и на проведение ремонтов и, как следствие, значительно снижается коэффициент использования установленной мощности энергетического оборудования тепловой электростанции.

Однако, несмотря на большое количество научных работ и несомненные успехи, до решения проблемы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котлоагрегатов ещё далеко. В настоящее время нет общей теории механизма шлакования и загрязнения, знание которого могло обеспечить необходимые меры по эффективному использованию котельной техники.

Для конкретного решения проблемы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котлов при сжигании КАУ необходимо:

- выполнить обобщение многочисленных результатов исследований по изучению механизма образования натрубных отложений при сжигании углей Канско-Ачинского бассейна. В результате обобщения следует разработать метод определения конструктивных решений размещения пароперегревательных поверхностей нагрева, что даст возможность уже на стадии проектирования заложить основы эффективной работы высокотемпературных поверхностей нагрева котельных агрегатов

- усовершенствовать технологию сжигания КАУ, в связи с чем необходимо проведение специальных исследований, направленных на разработку научно-обоснованных технических решений, применение которых позволяет воздействовать на процессы с участием минеральных компонентов.

2 Расчетная часть

2.1 Подготовка данных к расчету котельного агрегата БКЗ-500

Расчетные характеристики топлива приведены в таблице 2.1 [2].

Таблица 2.1 – Расчетные характеристики топлива

| Бассейн, месторождение | Марка топлива | Рабочая масса топлива, % | | | | | | | Выход летучих, V _Г , % | Теплота сгорания Q _{н^р} , кДж/ кг | Температуры плавления золы, °С | | |
|---------------------------|---------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|---|--------------------------------|----------------|----------------|
| | | W ^р | A ^р | S ^р | C ^р | H ^р | N ^р | O ^р | | | t ₁ | t ₂ | t ₃ |
| Ирша-Бородинское | 2-Б | 33 | 7.4 | 0.2 | 42.6 | 3 | 0.6 | 13.2 | 47 | 15280 | 1180 | 210 | 1230 |

Основные расчетные характеристики котла БКЗ-500-140-1 приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Расчетные характеристики котла БКЗ-500-140-1

| Наименование показателей | Обозначение | Величина |
|--|--------------------------|----------|
| Производительность котла, т/час | D | 500 |
| Давление в барабане котла, МПа | P _б | 15,88 |
| Температура перегретого пара, °С | t _{п.п.} | 555 |
| Температура питательной воды, °С | t _{пв} | 230 |
| Тип мельничного устройства | МВ | |
| Сушильный агент | Топочные и уходящие газы | |
| Потери тепла с уходящими газами, % | q ₂ | 7,7 |
| Потери тепла от химического недожога, % | q ₃ | 0 |
| Потери тепла от механического недожога, % | q ₄ | 0,5 |
| Потери тепла с физическим теплом шлака, % | q ₆ | 0,22 |
| Потери тепла в окружающую среду, % | q ₅ | 0,4 |
| Коэффициент полезного действия (брутто), % | η _{к.а.} | 91,2 |
| Расчетный расход топлива, кг/с | B _р | 20 |
| Теоретическая температура горения, °С | θ _а | 1588 |
| Температура газов на выходе из топки, °С | θ'' _т | 831 |
| Температура воздуха за воздухоподогревателем, °С | t _{вп} | 260 |
| Коэффициент избытка воздуха в топке | α _т | 1,2 |
| То же за воздухоподогревателем | α _{вп} | 1,23 |

2.2 Объемы теоретического количества воздуха и продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха α=1

Теоретический объем воздуха, V_в⁰ (м³/кг), для сжигания одного кг твердого топлива, определяется по следующему выражению:

$$V_{\text{в}}^0 = 0,0889 \cdot (C^{\text{р}} + 0,375 \cdot S^{\text{р}}) + 0,265 \cdot H^{\text{р}} - 0,0333 \cdot O^{\text{р}}, \quad (2.1)$$

где C^P – количество углерода на рабочую массу топлива, % (см. таблицу 2.1);
 S^P – количество серы на рабочую массу топлива, % (см. таблицу 2.1);
 H^P – количество водорода на рабочую массу топлива, % (см. таблицу 2.1);
 O^P – количество кислорода на рабочую массу топлива, % (см. таблицу 2.1).

$$V_B^0 = 0,0889(42,6 + 0,375 \cdot 0,2) + 0,265 \cdot 3 - 0,0333 \cdot 13,2 = 4,15 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем азота ($\text{м}^3/\text{кг}$) определяется по следующему выражению:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,8 \cdot \frac{N^P}{100}, \quad (2.2)$$

где V_B^0 – теоретически необходимый объем воздуха при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1$, $\text{м}^3/\text{кг}$ (см. формулу 2.1);

N^P – количество азота на рабочую массу топлива, % (см. таблицу 2.1).

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot 4,15 + 0,8 \cdot \frac{0,6}{100} = 3,28 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем трехатомных газов, $\text{м}^3/\text{кг}$, определяется по следующей формуле:

$$V_{RO_2} = 1,866 \cdot \frac{C^P + 0,375 \cdot S^P}{100}, \quad (2.3)$$

где C^P – то же, что и в формуле (2.1);

S^P – то же, что и в формуле (2.1).

$$V_{RO_2}^0 = 1,866 \cdot \frac{42,6 + 0,375 \cdot 0,2}{100} = 0,796 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяных паров для твердого топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$, определяется по следующему выражению:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^P + 0,0161 \cdot V_B^0, \quad (2.4)$$

где H^P – то же, что и в формуле (2.1);

W^P – влажность топлива на рабочую массу, % (см. таблицу 2.1);

V_B^0 – то же, что и в формуле (2.2);

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot 3 + 0,0124 \cdot 33 + 0,0161 \cdot 4,15 = 0,8 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объём дымовых газов, м³/кг, находим по формуле:

$$V_{\Gamma}^0 = V_{N_2}^0 + V_{RO_2}^0 + V_{H_2O}^0, \quad (2.5)$$

где $V_{N_2}^0$ – то же, что и в формуле (2.2);

$V_{RO_2}^0$ – то же, что и в формуле (2.3);

V_B^0 – то же, что и в формуле (2.2);

$$V_{\Gamma}^0 = 3,28 + 0,796 + 0,8 = 4,89 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2.3 Действительные объёмы продуктов сгорания по газоходам при коэффициенте избытка воздуха больше единицы

Объём газов, их масса, а также концентрация угольной пыли, подсчитанные для различных участков газохода, занесены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Объёмы продуктов сгорания, объёмные доли трехатомных газов и концентрация золовых частиц

| Название величины и обозначение | Газоход | |
|--|-----------------|-----------------------|
| | Топочная камера | Уходящие дымовые газы |
| Коэффициент избытка воздуха за поверхностью нагрева $\alpha'' = \alpha_T + \sum \alpha_i$ | 1.2 | 1.23 |
| Средний коэффициент избытка воздуха в поверхности нагрева $\alpha_{\text{ср}}$ | 1.2 | 1.215 |
| Объём водяных паров, м ³ / кг $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V_B^0$ | 0.822 | 0.823 |
| Полный объём газов, м ³ /кг $V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + 1,016 \cdot (\alpha_{\text{ср}} - 1) \cdot V_B^0$ | 5.731 | 5.794 |
| Объёмная доля трёхатомных газов $r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_{\Gamma}$ | 0.139 | 0.137 |
| Объёмная доля водяных паров $r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{\Gamma}$ | 0.143 | 0.142 |
| Суммарная объёмная доля $r_{\text{п}} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$ | 0.282 | 0.280 |
| Масса дымовых газов $G_{\Gamma} = 1 - 0,01 \cdot A^p + 1,306 \cdot \alpha_{\text{ср}} \cdot V_B^0$ | 7.429 | 7.510 |
| Концентрация золовых частиц, кг/кг, $\mu_{\text{зл}} = A^p \cdot a_{\text{ун}} / 100 \cdot G_{\Gamma}$ | 0.009 | 0.009 |

2.4 Энтальпия продуктов сгорания по газоходам

При сжигании твердого топлива энтальпия дымовых газов H_{Γ}^0 , кДж/кг, подсчитывается по следующей формуле:

$$H_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} \cdot (C \cdot \theta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 (C \cdot \theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (C \cdot \theta)_{H_2O}, \quad (2.6)$$

где V_{RO_2} – объем трехатомных газов, м³/кг (см. формулу 2.3);

$(C \cdot \theta)_{RO_2}$ – теплосодержание 1 Нм трехатомных газов, кДж/м³;

$V_{N_2}^0$ – теоретический объем азота, м³/кг (см. формулу 2.4);

$(C \cdot \theta)_{N_2}$ – теплосодержание 1 Нм азота, кДж/м³;

$V_{H_2O}^0$ – теоретический объем водяных паров, м³/кг (см. формулу 2.5);

$(C \cdot \theta)_{H_2O}$ – теплосодержание 1 Нм водяных паров, кДж/м³.

Энтальпия воздуха определяется из следующего выражения:

$$H_B^0 = V_B^0 \cdot (C \cdot \theta)_B, \quad (2.7)$$

где V_B^0 – то же, что и в формуле (2.2);

$(C \cdot \theta)_B$ – теплосодержание 1 Нм воздуха, кДж/м³.

Энтальпия продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива, кДж/кг, подсчитывается по формуле:

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot H_B^0 + H_{зола}, \quad (2.8)$$

где H_{Γ}^0 – энтальпия теоретического объема продуктов сгорания, кДж/кг (см. формулу 2.5);

α – коэффициент избытка воздуха за соответствующей поверхностью нагрева;

H_B^0 – энтальпия теоретического объема воздуха, кДж/кг (см. формулу 2.7).

Подсчитанные значения энтальпий заносим в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 - Энтальпия продуктов сгорания

| $\vartheta, ^\circ\text{C}$ | $H_{\Gamma}^0, \text{кДж/кг}$ | $H_{\text{в}}^0, \text{кДж/кг}$ | $H_{\text{зл}}, \text{кДж/кг}$ | $H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha'' - 1)H_{\text{в}}^0$ | |
|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|---------------------------|
| | | | | $\alpha_{\Gamma}=1,2$ | $\alpha_{\text{yx}}=1,23$ |
| 100 | 673.74 | 547.62 | 5.68 | 788.95 | 805.38 |
| 200 | 1366.12 | 1099.80 | 11.89 | 1597.97 | 1630.97 |
| 300 | 2077.91 | 1659.04 | 18.54 | 2428.26 | 2478.03 |
| 400 | 2851.81 | 2249.72 | 25.31 | 3327.07 | 3394.56 |
| 500 | 3616.64 | 2840.78 | 32.23 | 4217.02 | 4302.24 |
| 600 | 4402.05 | 3445.54 | 39.38 | 5130.53 | 5233.90 |
| 700 | 5207.89 | 4062.20 | 46.55 | 6066.88 | 6188.75 |
| 800 | 6031.61 | 4688.32 | 53.91 | 7023.18 | 7163.83 |
| 900 | 6870.19 | 5324.77 | 61.50 | 7996.65 | 8156.39 |
| 1000 | 7723.07 | 5968.28 | 69.15 | 8985.88 | 9164.93 |
| 1100 | 8589.34 | 6660.95 | 77.10 | 9998.62 | 10198.45 |
| 1200 | 9466.76 | 7280.93 | 84.82 | 11007.77 | 11226.19 |
| 1300 | 10356.3 | 7948.63 | 95.64 | 12041.79 | 12280.25 |
| 1400 | 11252.27 | 8621.06 | 111.23 | 13087.71 | 13346.35 |
| 1500 | 12157.44 | 9296.60 | 123.59 | 14140.34 | 14419.24 |
| 1600 | 13070.05 | 9977.45 | 134.18 | 15199.72 | 15499.04 |
| 1700 | 13991.58 | 10660.29 | 145.07 | 16268.71 | 16588.52 |
| 1800 | 14915.33 | 11344.13 | 156.25 | 17340.40 | 17680.73 |
| 1900 | 15845.05 | 12036.64 | 167.72 | 18420.10 | 18781.20 |
| 2000 | 16779.73 | 12729.89 | 176.85 | 19502.55 | 19884.45 |
| 2100 | 17721.45 | 13428.25 | 186.01 | 20593.11 | 20995.96 |
| 2200 | 18662.04 | 14125.20 | | | |
| 2300 | 19609.78 | 14826.42 | | | |

2.5 Позонный расчет топочной камеры при газовой сушке топлива после реконструкции

Для выполнения позонного расчета топки, оборудованной системой термоподготовки топочную камеру (рисунок 2.1) делим на две части. Считая камеры термообработки I зоной, в топочной камере уровень подвода вторичного воздуха осуществляется на высоте 6 м. Третичное дутье подается на расстоянии 10 м от входа в ширмовый пароперегреватель. Верхнюю часть (высотой 10 м) будем считать III зоной, нижнюю часть – II зоной.

Реконструкция топочной камеры котла Е-500 заключается в следующем. По углам топочной камеры выделяются отсеки (камеры термоподготовки) размером катетов 3 м × 3 м. Высота отсеков - 10 м. В верхнюю часть отсека подается угольная пыль и часть воздуха, которая должна обеспечить при сгорании топлива протекание процессов термического разложения, а также нагрев смеси до 800°С. Время пребывания в предтопке - более 1 с. В верхнюю часть камер термоподготовки подсасывается некоторое количество рециркулирующих газов.

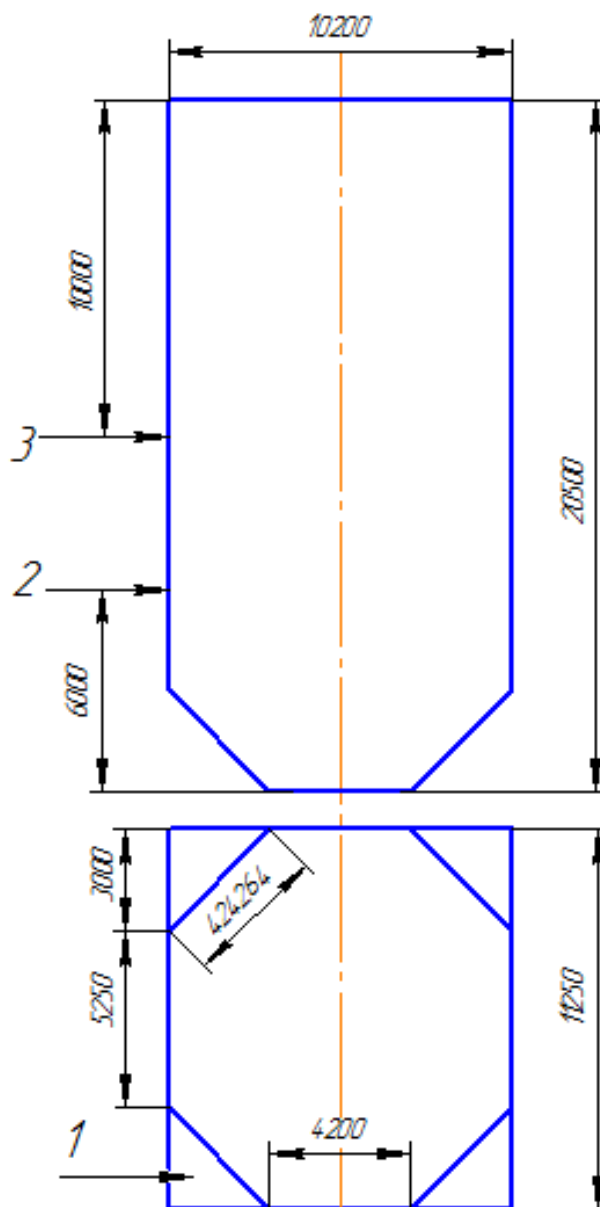


Рисунок 2.1 - Схема топки с угловыми камерами термообработки: 1 – камера термообработки, 2 – зона вторичного дутья, 3 – зона третичного дутья

2.5.1 Расчет II зоны (зона максимального тепловыделения)

Объем воздуха ($\text{м}^3/\text{кг}$), подаваемого во все зоны (см. формулу 2.1):

$$V_B^0 = 4,15 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Израсходовано в I зоне (камерах термоподготовки):

$$V_I^B = V_B^0 \frac{B_I}{B_p} = 4,15 \frac{1,1}{20} = 0,23 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.9)$$

где B_I - расход топлива в первой зоне на поддержание температуры 800°C , кг/с (см. формулу 3.22);

B_p - расчетный расход топлива, кг/с (см. таблицу 2.2).

Принимаем долю воздуха, подаваемого в III зону – 15%, тогда будет поступать воздуха в III зону:

$$V_{III}^B = V_B^0 \cdot 0,15 = 4,15 \cdot 0,15 = 0,62 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.10)$$

Объем воздуха на II зону:

$$V_{II}^B = V_B^0 - V_I^B - V_{III}^B = 4,15 - 0,23 - 0,62 = 3,3 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.11)$$

Тогда расход топлива в III зоне:

$$B_p^{III} = B_p \frac{V_{III}^B}{V_B} = 20 \frac{0,62}{4,15} = 2,99 \text{ кг/с}. \quad (2.12)$$

Расход топлива во II зоне:

$$B_p^{II} = B_p \frac{V_{II}^B}{V_B} = 20 \frac{3,3}{4,89} = 15,91 \text{ кг/с}. \quad (2.13)$$

Поскольку в камерах термоподготовки часть топлива сгорела, в расчете последующих двух ступеней будет особо учитываться тепло, внесенное из предтопок, расчетный расход топлива в топке (во II и III зоне) составит:

$$B_p^T = B_p - B_p^I = 20 - 1,1 = 18,9 \text{ кг/с}. \quad (2.14)$$

Относительная высота II зоны (рисунок. 2.1),:

$$\frac{h_3^{II}}{H_T} = \frac{10,5}{20,5} = 0,51, \quad (2.14)$$

где $h_3^{II} = 10,5 \text{ м}$ – высота II зоны,

$H_T = 20,5 \text{ м}$ – высота топки.

Степень выгорания топлива во II зоне:

$$\beta_{II} = \frac{V_{II}^B}{V_B - V_B^I} = \frac{3,3}{4,15 - 0,23} = 0,84. \quad (2.15)$$

Тепло, внесенное во II зону с воздухом:

$$Q_B^{II} = (\alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{II} - \Delta\alpha_{I3} - \Delta\alpha_{III3}) \cdot H_{г.в.} + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{II}) \cdot H_{х.в.}, \quad (2.16)$$

где α_T – коэффициент избытка воздуха в топке;

$\Delta\alpha_T$ – присосы воздуха в топке ($\Delta\alpha_T = 0,05$);

$\Delta\alpha_{пл}$ – присосы воздуха пылесистемы ($\Delta\alpha_{пл}=0,12$);
 $H_{г.в}$ – энтальпия горячего воздуха при $t=260^{\circ}\text{C}$ по таблице 2.2;
 $H_{х.в}$ – энтальпия холодного воздуха при $t=30^{\circ}\text{C}$ по таблице 2.2;
 $\Delta\alpha_{Iз}$, $\Delta\alpha_{IIIз}$ - доля воздуха, израсходованного в камерах термоподготовки и приходящаяся на III зону:

$$\Delta\alpha_{Iз} = \frac{B_I}{B_p} = \frac{1,1}{20} = 0,055 \quad (2.17)$$

$$\Delta\alpha_{IIIз} = \frac{B_{III}}{B_p} = \frac{2,99}{20} = 0,15 \quad (2.18)$$

$$Q_{\epsilon}^{II} = (1,2 - 0,05 - 0,12 - 0,055 - 0,15)1435,344 + (0,05 + 0,12)161 = 1211,53 \text{ кДж/кг.}$$

Тепло, внесенное с рециркулирующими газами:

$$Q_{рец} = H_{800} \cdot x_{подс} = 7023,18 \cdot 0,041 = 287,95 \text{ кДж/кг,} \quad (2.19)$$

где H_{800} – энтальпия газов при $t=800^{\circ}\text{C}$ по таблице 2.2;

$x_{подс}$ – коэффициент подсоса газов рециркуляции, принимаем 4,1%.

Тепло, внесенное из I зоны с продуктами сгорания во II зону (в расчете на 1 кг топлива):

$$Q_{Iз}^{II} = H_{800} \frac{B_I}{B_p} = 7023,18 \frac{1,1}{20} = 386,27 \text{ кДж/кг.} \quad (2.20)$$

Величина суммарной оптической толщины запыленного газового потока:

$$kps_T, \quad (2.21)$$

где k – коэффициент поглощения топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;

$p=0,1$ – давление в топочной камере, МПа;

s_T – эффективная толщина излучающего слоя топочной камеры, м.

Полная площадь поверхности стен топки F_T , м^2 , вычисляется как сумма плоскостей, ограничивающих объем камеры топки:

$$F_T = 796,1 \text{ м}^2.$$

Эффективная толщина излучающего слоя топки, м:

$$s_T = 3,6 \frac{V}{F_T} = 3,6 \frac{2292,86}{796,1} = 10,37 \text{ м} \quad (2.22)$$

где V_T – объем топки, м^3 ;

F_T – Полная площадь поверхности стен топки, м^2 .

Коэффициент поглощения топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, при сжигании твердых топлив определяется по формуле:

$$k = k_{\Gamma} r_{\Pi} + k_{\text{зл}} \mu_{\text{зл}} + k_{\text{к}}, \quad (2.23)$$

где k_{Γ} – коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;

r_{Π} – объемная доля трехатомных газов (принимается по таблице 2.4 для α_T);

$k_{\text{зл}}$ – коэффициент ослабления лучей взвешенными в топочной среде частицами летучей золы, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;

$\mu_{\text{зл}}$ – концентрация золовых частиц в топочной камере;

$k_{\text{к}}$ – коэффициент ослабления лучей частицами горящего кокса, принимаем $k_{\text{к}} = 0,5 \text{ } 1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$.

Коэффициент поглощения лучей, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, газовой фазой продуктов сгорания:

$$k_{\Gamma} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\Pi} s_T}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T_T''}{1000} \right), \quad (2.24)$$

где $r_{\text{H}_2\text{O}}$ – объемная доля водяных паров;

r_{Π} – суммарная доля трехатомных газов в продуктах сгорания;

s_T – эффективная толщина излучающего слоя топки, м ;

T_T'' – Абсолютная температура газов на выходе из топки, К .

Принимаем температура газов на выходе из топки 1150°C , тогда:

$$T_T'' = \vartheta_T'' + 273 = 1150 + 273 = 1423 \text{ К}. \quad (2.25)$$

$$k_{\Gamma} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,14}{\sqrt{0,28 \cdot 10,37}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1423}{1000} \right) = 2,32 \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$$

Коэффициент ослабления лучей взвешенными в топочной среде частицами летучей золы:

$$k_{\text{зл}} = \frac{43 \rho_{\Gamma}}{(T_T'' d_{\text{зл}})^{0,67}}, \quad (2.26)$$

где $\rho_{\Gamma} = 1300 \text{ г/м}^3$ – плотность дымовых газов при атмосферном давлении;

T_t'' – абсолютная температура газов на выходе из топки, К;

$d_{зл}$ – эффективный диаметр золы частиц, для мельниц вентиляторов
 $d_{зл}=16$ мкм.

$$k_{зл} = \frac{43 \cdot 1300}{(1423 \cdot 16)^{0,67}} = 67,23 \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}} \quad (2.27)$$

Тогда коэффициент поглощения, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, топочной средой по формуле (2.23):

$$k = 2,32 \cdot 0,28 + 67,23 \cdot 0,00946 + 0,5 = 1,786 \text{ } 1/(\text{м} \cdot \text{МПа}).$$

Тогда по (2.21):

$$kps_t = 1,786 \cdot 0,1 \cdot 10,37 = 1,85.$$

Степень черноты по kps_t , $a_{\phi} = 0,83$.

Задаемся температурой газов на выходе из II зоны $\vartheta_{II}'' = 1220^\circ\text{C}$

При этом энтальпия газов равна $H_{II}'' = 11214,57$ кДж/кг.

Теплоемкость продуктов сгорания:

$$V \cdot C'' = \frac{J''}{\vartheta_{II}''} = \frac{11214,57}{1220} = 9,19 \quad (2.28)$$

Коэффициент тепловой эффективности экрана:

$$\psi = \xi \cdot x, \quad (2.29)$$

где ξ - коэффициент загрязнения экранов ($\xi = 0,45$);

x - угловой коэффициент экрана;

Угловые коэффициенты:

-для выходного окна и мембранных экранов, отделяющих камеры термообработки от основной топки, $x = 1$;

-для остальных настенных экранов $x = 0,93$.

Для настенных экранов по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{экр}} = 0,93 \cdot 0,45 = 0,42.$$

Для остальных поверхностей по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{ост}} = 0,45 \cdot 1,0 = 0,45.$$

Площадь мембранных экранов $F_{\text{мембр}} = 170 \text{ м}^2$

Площадь выходного окна $F_{в.о.} = 115 \text{ м}^2$

Суммарная площадь поверхностей, ограничивающих II зону $F_{II} = 563,6 \text{ м}^2$.

Площадь остальных стен:

$$F_{откр} = F_{ст}^{II} - (F_{мембр} + F_{в.о.}) = 563,6 - (170 + 96,75) = 296,85 \text{ м}^2. \quad (2.30)$$

Тогда средний коэффициент тепловой эффективности экрана:

$$\psi_{cp} = \frac{\psi_{откр} \cdot F_{откр} + (F_{мембр} + F_{в.о.}) \cdot \psi_{ост}}{F_{откр} + F_{мембр} + F_{в.о.}} = \frac{0,42 \cdot 296,85 + (170 + 96,75) \cdot 0,45}{296,85 + 170 + 96,75} = 0,43 \quad (2.31)$$

Коэффициент, характеризующий отдачу тепла в вышерасположенную зону:

$$\psi' = 0,1.$$

Степень черноты топки во II зоне:

$$a_m = \frac{a_\phi}{a_\phi + (1 - a_\phi) \cdot \psi_{cp}} = \frac{0,83}{0,83 + (1 - 0,83) \cdot 0,43} = 0,92 \quad (2.32)$$

Произведение $\psi \cdot F_{II}$ равно:

$$\psi \cdot F_{II} = \psi_{cp} \cdot F_{II} + \psi' \cdot F_{в.о.} = 0,43 \cdot 563,6 + 0,1 \cdot 96,75 = 252,023 \quad (2.33)$$

Температура газов на выходе из II зоны:

$$\vartheta_{II}'' = \frac{\beta_{сг}^{II} \cdot Q_n^p + Q_{в} + Q_{Iзн}}{(V \cdot C)''} - \frac{C_o \cdot a_T \cdot (T'')^4}{B_p \cdot (V \cdot C'')} \cdot \psi \cdot F_{II} \quad (2.34)$$

где C_o - постоянная Стефана-Больцмана;

Q_n^p - низшая рабочая теплота сгорания.

$$\vartheta_{II}'' = \frac{0,84 \cdot 15280 + 1211,53 + 386,27}{9,19} - \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,92 \cdot (1493)^4}{20 \cdot (9,19)} \cdot 252,023 = 1215^\circ\text{C}$$

Ранее задавались температурой $\vartheta'' = 1220^\circ\text{C}$, совпадение допустимо.

2.5.2 Расчет III (выходной) зоны (от сопел третичного дутья до выходного окна)

Площадь выходного окна: $F_{в.о.} = 115 \text{ м}^2$

Площадь мембранных экранов: $F_{\text{мембр}} = 101,76 \text{ м}^2$, для этой поверхности $x=1$.

Площадь боковых стен, ограниченных настенными экранами: $F_{\text{б.ст. III}} = 285 \text{ м}^2$, для этих поверхностей $x = 0,93$.

Коэффициент загрязнения для всех стен принят $\xi = 0,45$

Для мембранных поверхностей коэффициент эффективности по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{мембр}} = 1 \cdot 0,45 = 0,45.$$

Для стен, покрытых экранами коэффициент эффективности по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{экp}} = 0,93 \cdot 0,45 = 0,42.$$

Для выходного окна угловой коэффициент $x=1$, коэффициент загрязнения $\xi = 0,45$, тогда:

$$\psi_{\text{в.о.}} = 1 \cdot 0,45 = 0,45.$$

Среднее значение коэффициента эффективности:

$$\psi_{\text{cp}} = \frac{\psi_{\text{в.о.}} \cdot F_{\text{в.о.}} + F_{\text{мембр}} \cdot \psi_{\text{мембр}} + F_{\text{б.ст. III}} \cdot \psi_{\text{экp}}}{F_{\text{в.о.}} + F_{\text{мембр}} + F_{\text{б.ст.}}} = \frac{0,45 \cdot 115 + 101,76 \cdot 0,45 + 285 \cdot 0,42}{115 + 101,76 + 285} = 0,433 \quad (2.35)$$

Доля топлива, сгорающего в III зоне пропорциональна количеству поданного в эту зону воздуха $\Delta\beta_{III} = 0,15$.

Температура газов на входе в III зону (из расчета II зоны): $\vartheta_{III}' = 1215^\circ\text{C}$.

Энтальпия газов $H_{III}' = 11162,87 \text{ кДж/кг}$.

Принимаем предварительно температуру дымовых газов на выходе из III зоны $\vartheta'' = 1150^\circ\text{C}$.

При этом энтальпия $H_{III}'' = 10503 \text{ кДж/кг}$.

Теплоемкость продуктов сгорания по формуле (2.28):

$$V \cdot C'' = \frac{10503}{1150} = 9,13.$$

Средняя температура газов:

$$\vartheta_{\text{cp}}^{III} = \frac{1215 + 1150}{2} = 1182,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Эффективная степень черноты топки: $a_t = 0,92$.

Коэффициент переизлучения в данную зону:

$$\psi'' - \psi' = 0,433 - 0,1 = 0,333,$$

где $\psi' = 0,1$ – для топок, работающих на угле с твердым шлакоудалением,
 $\psi'' = \psi_{\text{ср}} = 0,433$ (формула 2.35).

Температура газов на выходе из III зоны:

$$g_{\text{III}}'' = \frac{\Delta\beta \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{V \cdot C''} + \frac{C'}{C''} \cdot \theta' - \left[1 + \left(\frac{T''}{T} \right)^4 \right] \cdot \frac{C_o \cdot a_{\text{т}}}{2 \cdot B_p \cdot V \cdot C''} \cdot (T')^4 \cdot [F_{\text{во}}^{\text{II}} \cdot (\psi'' - \psi') + \psi_{\text{ср}} \cdot F_{\text{III}}^{\text{сум}}] \quad (2.36)$$

$$g_{\text{III}}'' = \frac{0,15 \cdot 15280}{9,13} + 1215 - \left[1 + \left(\frac{1423}{1488} \right)^4 \right] \cdot \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,92 \cdot (1488)^4}{2 \cdot 20 \cdot 9,13} \cdot [115 \cdot 0,333 + 0,433 \cdot 501,76] =$$

$$= 1135^{\circ}\text{C}.$$

Расхождение с принятым значением температуры допустимо.

Расчеты показали, что в предлагаемой конструкции топки с камерой термоподготовки топлива перед сжиганием (около 800°C), температура в топке не превышает 1250°C , что позволяет надеяться на значительное сокращение образования топочных окислов азота. Уменьшение теплоотдачи излучением, ввиду низких температур во всех трех зонах, компенсируется увеличением поверхностей нагрева мембранными экранами.

3 Расчет камеры термоподготовки

3.1 Тепловой расчет камер термоподготовки

В камеру термоподготовки поступает пыль с влажностью $W^{\text{п}} = 4\%$. В верхней части предтопка на высоте 1 м экраны ошипованы и покрыты хромитовой массой для создания зоны надежного воспламенения.

Таблица 3.1 - Конструктивные размеры камер термоподготовки

| | |
|--|---|
| Площадь стен, ограничивающих объем данной камеры термоподготовки | $F_{\text{ст}} = 102,4 \text{ м}^2$ |
| Высота камеры | $h = 10 \text{ м}$ |
| Площадь поперечного сечения (выходного окна) | $f_{\text{сеч}} = 4,5 \text{ м}^2$ |
| Площадь настенных экранов в работе предтопка | $F_{\text{экp}} = 60 \text{ м}^2$ |
| Площадь мембранного экрана в одном предтопке | $F_{\text{м}} = 42,4 \text{ м}^2$ |
| Площадь стен, ограничивающих объем одного предтопка | $F_{\text{ст}} = 102,4 \text{ м}^2$ |
| При этом площадь утепления предтопка | $F_{\text{ут.}} = 10,24 \text{ м}^2$ |
| Площадь открытых экранов в предтопке | $F_{\text{экp}}^{\text{np.}} = 54 \text{ м}^2$ |
| Площадь открытой части мембранного экрана в предтопке | $F_{\text{м}}^{\text{np.}} = 38,16 \text{ м}^2$ |
| Объем предтопка | $V_{\text{пр.}} = 45 \text{ м}^3$ |

Концентрация золы $\mu_3 = 0,0094633$ кг/кг (таблица 2.3).

Суммарная объемная доля водяных паров и трехатомных газов $\gamma_{\text{п}} = 0,2824$ (таблица 2.3)

Полная площадь поверхности стен предтопка $F_{\text{пр}}$, м^2 , вычисляется как сумма плоскостей, ограничивающих объем камеры термоподготовки:

$$F_{\text{пр}} = F_{\text{ст}} + 2f_{\text{сеч}} = 102,4 + 2 \cdot 4,5 = 111,4 \text{ м}^2. \quad (3.1)$$

Эффективная толщина излучающего слоя камеры термоподготовки, м:

$$s_{\text{т}} = 3,6 \frac{V_{\text{пр}}}{F_{\text{пр}}} = 3,6 \frac{45}{111,4} = 1,41 \text{ м}, \quad (3.2)$$

где $V_{\text{пр}}$ – объем предтопка, м^3 ;

$F_{\text{пр}}$ – полная площадь поверхности стен предтопка, м^2 .

Абсолютная температура газов на выходе из предтопка $T''_{\text{пр}}$, К:

$$T''_{\text{пр}} = \vartheta''_{\text{пр}} + 273 = 800 + 273 = 1073 \text{ К}, \quad (3.3)$$

где $\vartheta''_{\text{пр}}$ – температура в предтопке.

Коэффициент поглощения лучей, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, газовой фазой продуктов сгорания по формуле (2.24):

$$k_{\text{г}} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,14}{\sqrt{0,28 \cdot 1,41}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1073}{1000} \right) = 9,03 \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}$$

Коэффициент ослабления лучей взвешенными в топочной среде частицами летучей золы:

$$k_{\text{зл}} = \frac{43\rho_{\text{г}}}{\left(T''_{\text{т}} d_{\text{зл}} \right)^{0,67}}, \quad (3.4)$$

где $\rho_{\text{г}} = 1300$ $\text{г}/\text{м}^3$ – плотность дымовых газов при атмосферном давлении;

$T''_{\text{т}}$ – абсолютная температура газов на выходе из камеры термоподготовки, К;

$d_{\text{зл}}$ – эффективный диаметр золовых частиц, для мельниц вентиляторов $d_{\text{зл}} = 16$ мкм.

$$k_{\text{зл}} = \frac{43 \cdot 1300}{(1073 \cdot 16)^{0,67}} = 81,311 \frac{1}{\text{м} \cdot \text{МПа}}.$$

Тогда коэффициент поглощения, $1/(м \cdot МПа)$, топочной средой по уравнению (2.23):

$$k = 9,03 \cdot 0,28 + 81,311 \cdot 0,00946 + 0,5 = 3,797.$$

Тогда по (2.21):

$$kps_T = 3,797 \cdot 0,1 \cdot 1,41 = 0,535$$

Степень черноты факела $a_\phi = 0,18$.

Коэффициент загрязнения стен $\xi = 0,5$.

Угловой коэффициент для экранных поверхностей $x_{\text{экр}} = 0,98$.

Угловой коэффициент для мембранной поверхности $x_M = 1$.

Коэффициент тепловой эффективности для экранных поверхностей по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{экр}} = 0,98 \cdot 0,5 = 0,49$$

Коэффициент тепловой эффективности для мембранной поверхности по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{мемб}} = 1 \cdot 0,5 = 0,5$$

Коэффициент тепловой эффективности для "утепленной" части камеры термоподготовки при $\xi = 0,2$, по формуле (2.29):

$$\psi_{\text{ут}} = x_{\text{ут}} \cdot \xi = 0,98 \cdot 0,2 = 0,196$$

Средний коэффициент тепловой эффективности

$$\psi_{cp} = \frac{\psi_{\text{экр}} \cdot F_{\text{экр}} + \psi_{\text{мемб}} \cdot F_{\text{мемб}} + \psi_{\text{ут}} \cdot F_{\text{ут}}}{F_{\text{экр}} + F_{\text{мемб}} + F_{\text{ут}}}, \quad (3.5)$$

$$\psi_{cp} = \frac{0,49 \cdot 54 + 38,16 \cdot 0,5 + 10,24 \cdot 0,196}{54 + 38,16 + 10,24} = 0,464.$$

Температура нагреваемой среды в экранных и мембранных трубках близка к температуре насыщения при давлении в экранах $P_{\text{экр}} = 15,88 \text{ МПа}$, $t_{\text{кип}} = 346^\circ\text{C}$

Температура наружного загрязнения стенки $t_3 = 346 + 60 = 406^\circ\text{C}$.

$a_\phi = 0,4$ [2].

Коэффициент теплоотдачи излучением [2]:

$$\alpha_{\text{л}} = \alpha_{\text{н}} \cdot a_\phi = 146 \cdot 0,4 = 58,4 \text{ Вт/м}^2\text{К}. \quad (3.6)$$

Принимаем среднюю температуру газов в камере термоподготовки $\vartheta_{cp} = 800^\circ\text{C}$ (температура, необходимая для термообработки топлива).

Температурный напор:

$$\Delta t_{cp} = \vartheta_{cp} - t_3 = 800 - 406 = 394^\circ\text{C}. \quad (3.7)$$

Принимаем скорость газов $W_r = 5 \text{ м/с}$.

Тогда (для продольного омывания) [2]: $\alpha_n = 12 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Коэффициент теплоотдачи [2]: $\alpha_k = 12 \cdot 0,9 = 11,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Суммарный коэффициент теплоотдачи от газов стенке:

$$\alpha_1 = (\alpha_k + \alpha_n) = 11,7 + 58,4 = 70,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (3.8)$$

Коэффициент теплопередачи:

$$K = \psi \cdot \alpha_1 = 0,464 \cdot 70,1 = 32,53 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (3.9)$$

Количество тепла, переданного в четырех камерах термоподготовки через ограждающие его поверхности:

$$Q_{т.о.} = K \cdot \Delta t_{cp} \cdot F_{ст} \cdot 4 / 1000 = 32,53 \cdot 394 \cdot 102,4 \cdot 4 = 5249,77 \text{ кДж/с}. \quad (3.10)$$

Тепловой баланс камеры термоподготовки:

а) Приходные статьи баланса.

В верхнюю часть камер термоподготовки подсасываются дымовые газы из верхней части топки. Их температуру принимаем равной $\vartheta_{рец}' = 1100^\circ\text{C}$. При этом энтальпия $H_r' = 9998,62 \text{ кДж/кг}$.

Тепло, внесенное с рециркулируемыми газами:

$$Q_{рец} = H_r' \cdot x_{подс} \cdot V_p = 9998,62 \cdot 0,041 \cdot 20 = 8198,87 \text{ кДж/с}, \quad (3.11)$$

где V_p – то же, что и формуле (2.9);

$x_{подс}$ – доля подсоса газов.

Тепло, внесенное с сушильным агентом:

$$Q_{ca}' = C_{ca} \cdot t_{ca}' \cdot g_{ca} \cdot V_p = 1,06 \cdot 180 \cdot 1,125 \cdot 20 = 4293 \text{ (кДж/с)}, \quad (3.12)$$

где $C_{ca} = 1,06 \text{ кДж/кг}$ – теплоемкость сушильного агента;

$t_{ca}' = 180^\circ\text{C}$ – температура сушильного агента после сушки топлива;

$g_{ca} = 1,125 \text{ кг/кг}$ – расход сушильного агента.

Тепло, внесенное с горячим воздухом при температуре воздуха $t_v = 260^\circ\text{C}$:

$$Q_v = V_I \cdot H_v = 1435,344 \cdot V_I \text{ кДж/с}, \quad (3.13)$$

где H_v - энтальпия воздуха ($H_v = 1435.344$ кДж/кг).

V_I -расход топлива в камерах термopодготовки.

Полезное тепловыделение в камерах термopодготовки:

$$Q_{пр}=(Q_n^p+Q_v) \cdot V_I=(15280+1435,344) \cdot V_I=16715,34 \cdot V_I \text{ кДж/с.} \quad (3.14)$$

Кроме того, в поток газов подается угольная пыль, подлежащая термообработке, в количестве $(V_p - V_I)$ кг/с.

Тепло, внесенное с этой пылью (при температуре 175°C):

$$Q_{п}=(V_p-V_I) \cdot C_T \cdot t_T=(20-V_I) \cdot 1,16 \cdot 175=4060-203 \cdot V_I, \quad (3.15)$$

где C_T – теплоемкость угля $C_T = 1,16$ кДж/кг·К.

Приходные статьи баланса:

$$Q_{прих}=Q_{рец}+Q_{са}'+Q_{пр}+Q_{п}= 8198,87+4293+16715,34 \cdot V_I+4060-203 \cdot V_I, \quad (3.16)$$

$$Q_{прих}=16551,87+16512,34 \cdot V_I.$$

б) Расходные статьи баланса.

Нагрев топлива, подаваемого для термообработки:

$$Q_{терм}=(V_p-V_I) \cdot C_T(800-t_I)=(20-V_I) \cdot 1,16 \cdot (800-175)=14500-725 \cdot V_I \quad (3.17)$$

Количество тепла, передаваемого через стены камер термopодготовки (см. формулу 3.10):

$$Q_{т.о.}=5249,77 \text{ кДж/с.}$$

Количество тепла, уносимого с газами рециркуляции:

$$Q_{рец}''=H_{800} \cdot X_{подс} \cdot V_p=7023,18 \cdot 0,041 \cdot 20=5759 \text{ кДж/с,} \quad (3.18)$$

где H_{800} - энтальпия газов при температуре 800°C ($H_{800}=7023,18$ кДж/кг).

Количество тепла, уносимого с газами, образовавшимися от сгорания части топлива:

$$Q_{вых.}''=H_{800} \cdot V_I=7023,18 \cdot V_I. \quad (3.19)$$

Расход тепла на испарение влаги, содержащейся в несгоревшей части топлива при $W^п=4\%$:

$$Q_{исп}=(V_p-V_I) \cdot W^п \cdot Q_{вл}=(20-V_I) \cdot 0,04 \cdot 2260=1808-90,4 V_I, \quad (3.20)$$

где $Q_{вл}=2260$ кДж/кг – удельный расход энергии на испарение.

Расход тепла на термическое разложение угля:

$$Q_{\text{разл}} = (B_p - B_I) \cdot Q_{\text{py}} = (20 - B_I) \cdot 29,3 = 586 - 29,3 \cdot B_I \text{ кДж/с}, \quad (3.21)$$

где $Q_{\text{py}} = 29,3 \text{ кДж/кг}$ – удельный расход энергии на разложение.

Сумма расходов тепла:

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{терм}} + Q_{\text{т.о.}} + Q_{\text{рец}}'' + Q_{\text{вых}}'' + Q_{\text{разл}}'' + Q_{\text{исп}} = \quad (3.22)$$

$$= 14500 - 725 \cdot B_I + 5249,77 + 5759 + 7023,18 \cdot B_I + 586 - 29,3 \cdot B_I + 1808 - 90,4 \cdot B_I;$$

$$Q_{\text{расх}} = 27902,77 + 6178,48 \cdot B_I;$$

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}};$$

$$12258,87 + 16512,34 \cdot B_I = 27902,77 + 6178,48 \cdot B_I;$$

$$B_I = 1,1 \text{ кг/с}.$$

Расход топлива в камерах термоподготовки на поддержание температуры 800°C для термической подготовки угольной пыли равен $1,1 \text{ кг/с}$.

3.2 Аэродинамический расчет камер термоподготовки

Аэродинамический расчет камер термоподготовки котла Е-500 при сжигании Ирша-Бородинских углей и газовой сушке топлива выполняется по нормативному методу [3]. Основные исходные данные берутся из теплового расчета.

Проходное сечение канала - треугольной формы:

Площадь сечения $F = 4,5 \text{ м}^2$;

Периметр $U = 3 \cdot 2 + 4,25 = 10,25 \text{ м}$;

Средняя температура газов в предтопке (см. тепловой расчет): $\vartheta_{\text{ср}}^{\text{пр}} = 800^\circ\text{C}$.

Средняя температура в топочной камере в районе предтопка: $\vartheta_{\text{ср}}^{\text{т}} = 1215^\circ\text{C}$ (см. тепловой расчет).

Высота камеры термоподготовки $h_{\text{пр}} = 10 \text{ м}$.

Ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

Плотность дымовых газов $\rho = 1,32 \text{ кг/м}^3$.

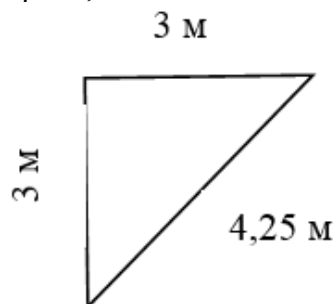


Рисунок 3.1– проходное сечение камеры термоподготовки

Величина самотяги, Па:

$$H_c = h_{np} \cdot g \left[1,23 - 1,32 \frac{273}{273 + \vartheta_{cp}^{np}} \right] = 10 \cdot 9,81 \cdot \left[1,23 - 1,32 \frac{273}{273 + 800} \right] = 87,7 \text{ Па.} \quad (3.23)$$

Аэродинамическое сопротивление предтопка складывается из сопротивления трения в трехгранном канале и сопротивления изменения сечения канала при выходе из камеры термоподготовки.

а) Сопротивление трения в канале.

Скорость газов в предтопке $W_{пр} = 5 \text{ м/с}$.

Эквивалентный диаметр:

$$d_3 = \frac{4 \cdot F}{U} = \frac{4 \cdot 4,5}{10,24} = 1,76 \text{ м.} \quad (3.24)$$

Для стальных поверхностей коэффициент трения: $\lambda = 0,015$.

Тогда сопротивление трения в канале предтопка:

$$\Delta H_{тр} = \lambda \cdot \frac{1}{d_3} \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \rho = 0,015 \cdot \frac{10}{1,76} \cdot \frac{5^2}{2} \cdot 1,32 = 1,4 \text{ Па.} \quad (3.25)$$

б) Сопротивление изменения сечения канала при выходе из камеры термоподготовки:

$$\Delta H_m = \frac{\zeta_m \cdot W^2}{2} \cdot \rho = \frac{0,4 \cdot 5^2}{2} \cdot 1,32 = 6,6 \text{ Па,} \quad (3.26)$$

где ζ_m - коэффициент местного сопротивления ($\zeta_m = 0,4$ при изменении сечения $F1/F2 = 0,2$)

Суммарное аэродинамическое сопротивление предтопка:

$$\Delta P_{пред} = \Delta H_{тр} + \Delta H_m = 1,4 + 6,6 = 8 \text{ Па.} \quad (3.27)$$

Сопротивление предтопка с учетом самотяги:

$$\Delta P_{сум} = \Delta P_{пред} + H_c = 8 + 87,7 = 95,7 \text{ Па.} \quad (3.28)$$

Это сопротивление следует преодолеть за счет кинетической энергии струи, вытекающей из горелочного устройства.

3.3 Гидравлический расчет контура циркуляции камеры термоподготовки

Целью гидравлического расчета контура циркуляции камеры термоподготовки является определение действительной скорости циркуляции, полезного напора, возможности застоя и опрокидывания циркуляции при заданной нагрузке котла. Контур циркуляции изображен на рисунках 3.1, 3.2.

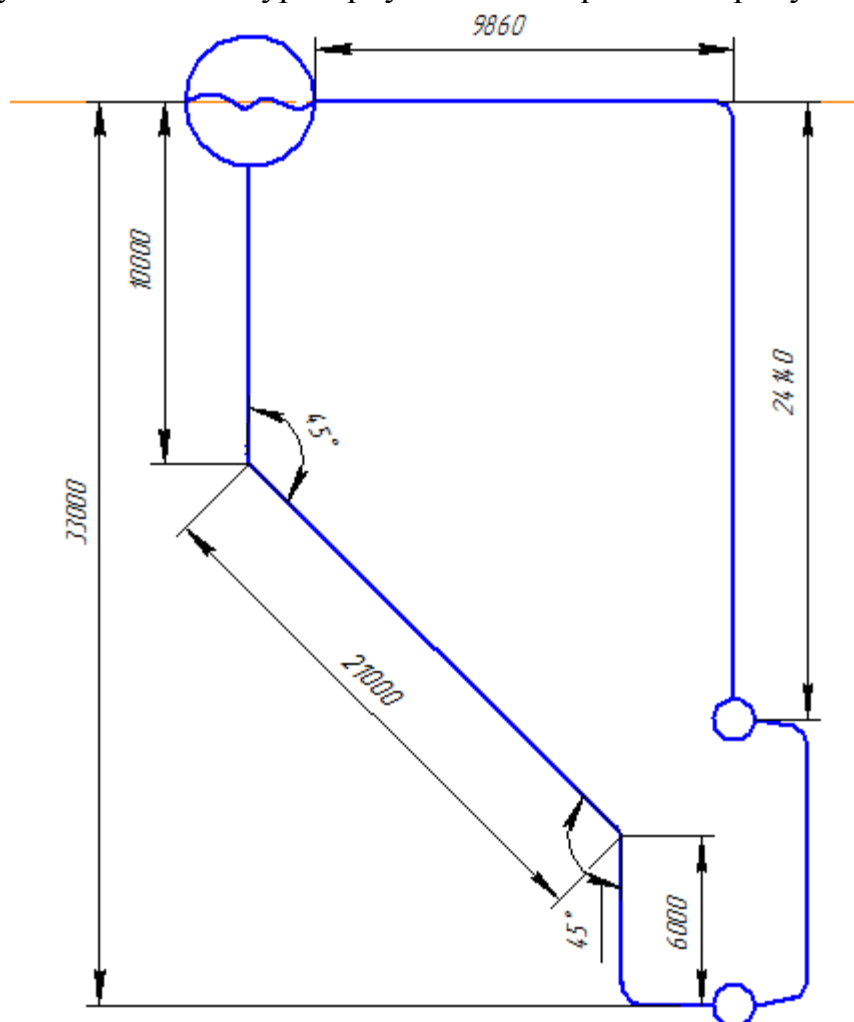


Рисунок 3.2 - Расчетная схема циркуляционного контура

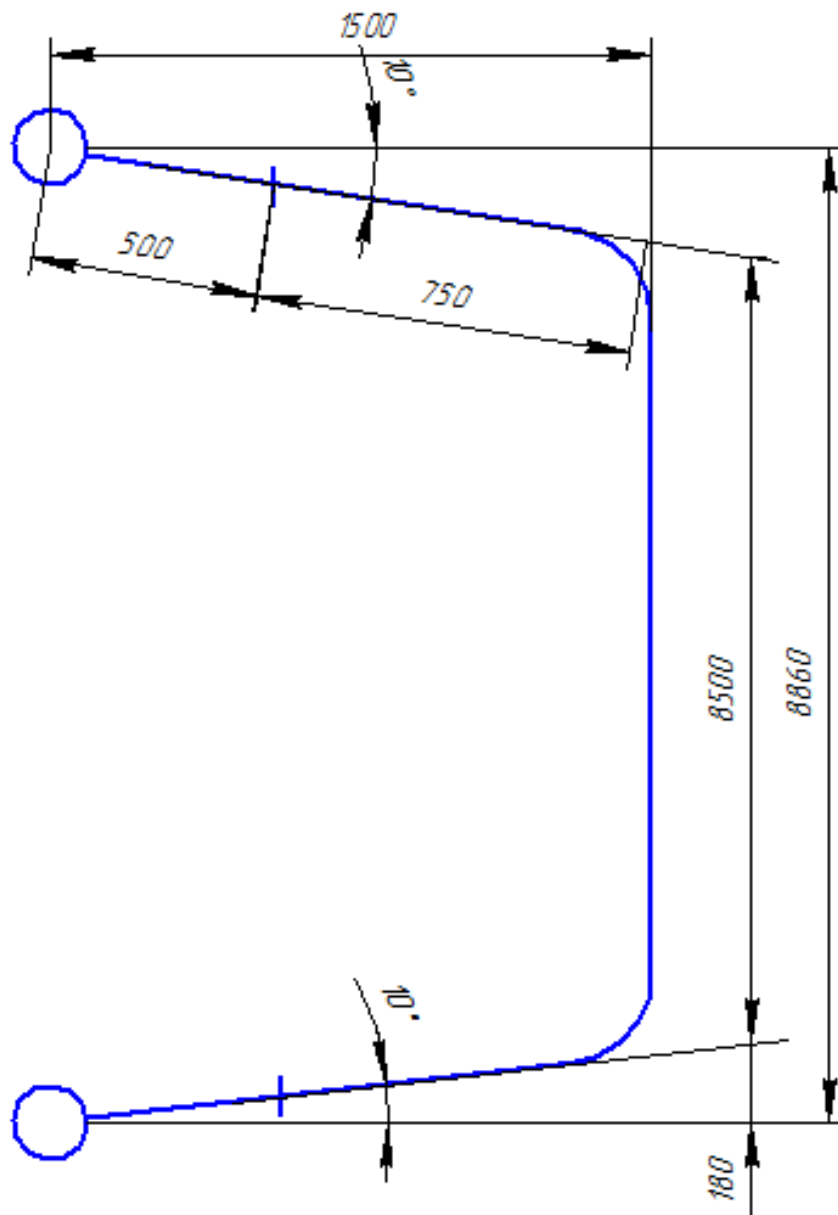


Рисунок 3.3 - Схема включения труб мембранного экрана

Исходные конструктивные данные для расчета приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Конструктивные данные к расчету

| Наименование величины | Обозначение | Формула | Величина |
|--|---|---|-----------------|
| 1. Опускные трубы | | | |
| Внутренний диаметр, мм | $d_{\text{вн}}^{\text{оп}}$ | Задается | 164 |
| Количество опускных труб, шт | $n_{\text{оп}}$ | Задается | 1 |
| Суммарное сечение опускных труб, м ² | $F_{\text{оп}}$ | $\frac{\pi \cdot (d_{\text{вн}}^{\text{оп}})^2}{4} n_{\text{оп}}$ | 0,0211 |
| Высота опускных труб, м | $h_{\text{оп}}$ | Схема контура | 33 |
| Суммарная длина опускных труб, м | $l_{\text{оп}}$ | Схема контура | 37 |
| Углы гибов труб | $\alpha_1^{\text{оп}}, \alpha_2^{\text{оп}}, \dots$ | Схема контура | 45, 45,90 |
| Коэффициенты сопротивления поворотов в опускных трубах | $\xi_1^{\text{оп}}, \xi_2^{\text{оп}}, \dots$ | [4, с. 35] | 1,75, 1,75, 0,5 |
| Суммарный коэффициент сопротивления поворотов в опускных трубах | $\sum \xi_{\text{пов}}^{\text{оп}}$ | $\xi_1^{\text{оп}} + \xi_2^{\text{оп}} + \dots$ | 4 |
| Коэффициент сопротивления входа из барабана в опускные трубы и выхода в нижний коллектор | $\xi_{\text{вх}}^{\text{оп}}, \xi_{\text{вых}}^{\text{оп}}$ | [4, с. 34] | 1 1,1 |
| Суммарный коэффициент местных сопротивлений опускных труб | $\sum \xi_{\text{мест}}^{\text{оп}}$ | $\xi_{\text{вх}}^{\text{оп}} + \xi_{\text{вых}}^{\text{оп}}$ | 2,1 |
| Приведенный коэффициент трения для опускных труб | $\lambda_0^{\text{оп}}$ | По величине $d_{\text{вн}}^{\text{оп}}$ [4, с. 10] | 0,104 |
| 2. Подъемные трубы | | | |
| Внутренний диаметр труб, м | $d_{\text{вн}}^{\text{экp}}$ | Задается | 0,048 |
| Шаг труб в экране | s/d | Задается | 0,064 |
| Ширина экрана, включенная в контур, м | $B_{\text{экp}}$ | Чертеж котла | 2,12 |
| Количество подъемных труб, шт | $n_{\text{экp}}$ | $\frac{B_{\text{экp}}}{s} - 1$ | 34 |
| Суммарное сечение подъемных труб, м ² | $F_{\text{экp}}$ | $\frac{\pi \cdot (d_{\text{вн}}^{\text{экp}})^2}{4} n_{\text{экp}}$ | 0,0615 |
| Длина труб до обогрева, м | $l_{\text{до}}$ | Схема контура | 0,5 |
| Длина обогреваемого участка труб, м | $l_{\text{об}}$ | Схема контура | 10 |
| Длина труб после обогрева, м | $l_{\text{по}}$ | Схема контура | 0,5 |
| Полная длина экранных труб, м | l_0 | $l_{\text{до}} + l_{\text{об}} + l_{\text{по}}$ | 11 |
| Высота труб до обогрева, м | $H_{\text{до}}$ | Схема контура | 0,09 |

Окончание таблицы 3.2

| Наименование величины | Обозначение | Формула | Величина |
|---|---|--|----------|
| Высота обогреваемой части труб, м | $H_{об}$ | Схема контура | 8,76 |
| Высота участка после обогрева, м | $H_{по}$ | Схема контура | 0,09 |
| Полная высота экранных труб, м | H_0 | $H_{до} + H_{об} + H_{по}$ | 8,94 |
| Углыгиба труб по высоте экрана | $\alpha_1^{экр}, \alpha_2^{экр}, \dots$ | Схема контура | 80, 80 |
| Коэффициент сопротивления поворота экранных труб | $\xi_1^{экр}, \xi_2^{экр}, \dots$ | [4, с. 35] | 1,5, 1,5 |
| Суммарный коэффициент поворотов экранных труб | $\sum \xi_{пов}^{экр}$ | $\xi_1^{экр} + \xi_2^{экр} + \dots$ | 3 |
| 3. Пароотводящие трубы | | | |
| Внутренний диаметр, мм | $d_{вн}^{отв}$ | Задается | 113 |
| Количество отводящих труб, шт | $n_{отв}$ | Задается | 2 |
| Суммарное сечение отводящих труб, м ² | $F_{отв}$ | $\frac{\pi \cdot (d_{вн}^{отв})^2}{4} n_{отв}$ | 0,02 |
| Полная длина отводящих труб, м | $l_{отв}$ | Схема контура | 34 |
| Высота отводящих труб, м | $H_{отв}$ | Схема контура | 24,14 |
| Углыгибов труб | $\alpha_1^{отв}, \alpha_2^{отв}, \dots$ | Схема контура | 90 |
| Коэффициенты сопротивления поворотов в отводящих трубах | $\xi_1^{отв}, \xi_2^{отв}, \dots$ | [4, с. 35] | 0,5 |
| Суммарный коэффициент сопротивления отводящих труб | $\sum \xi_{пов}^{отв}$ | $\xi_1^{отв} + \xi_2^{отв} + \dots$ | 2,5 |
| Коэффициент сопротивления выхода из сборного коллектора и входа в барабан | $\xi_{вх}^{отв}, \xi_{вых}^{отв}$ | [4, с. 34] | 1,1 1 |
| Суммарный коэффициент входа-выхода пароотводящих труб | $\sum \xi_{мест}^{отв}$ | $\xi_{вх}^{отв} + \xi_{вых}^{отв}$ | 2,1 |

В контур включается половина ширины мембранного экрана. Тогда площадь этой части экрана со стороны камеры термоподготовки:

$$F_{ит} = \frac{4,24 \cdot 10}{2} = 21,2 \text{ м}^2. \quad (3.29)$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны камеры термоподготовки $K = 32,53$ Вт/м²·К (см. тепловой расчет).

Тогда тепло воспринятое экраном со стороны камеры термоподготовки:

$$Q_{\text{пред}}^{\text{к}} = F_{\text{пт}} \cdot k \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 21,2 \cdot 32,53 \cdot 394 = 271716,6 \text{ Вт},$$

где Δt - средний температурный напор ($\Delta t = 800 - 406 = 394^\circ\text{C}$).

$$Q_{\text{пред}}^{\text{к}} = 271,7 \text{ кДж/с}.$$

Тепло, внесенное во II и III зоны с воздухом:

$$\begin{aligned} Q_{\text{в}} &= (\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{пу}} - \Delta\alpha_{\text{из}})H_{\text{г.в.}} + (\Delta\alpha_{\text{т}} + \Delta\alpha_{\text{пу}})H_{\text{х.в.}} = \\ &= (1,2 - 0,05 - 0,12 - 0,055) \cdot 1435,344 + (0,05 + 0,12) \cdot 161 = 1426,83 \text{ кДж/кг}, \end{aligned} \quad (3.30)$$

где $\alpha_{\text{т}}$ – то же, что в формуле (2.16);

$\Delta\alpha_{\text{т}}$ – то же, что в формуле (2.16);

$\Delta\alpha_{\text{пл}}$ – то же, что в формуле (2.16);

$H_{\text{г.в.}}$ – то же, что в формуле (2.16);

$H_{\text{х.в.}}$ – то же, что в формуле (2.16);

$\Delta\alpha_{\text{из}}$ – то же, что в формуле (2.16).

Тепло, внесенное с рециркулирующими через предтопок газами:

$$Q_{\text{рец}}' = H_{800} \cdot x_{\text{подс}} = 7023,18 \cdot 0,041 = 287,95 \text{ кДж/кг}. \quad (3.31)$$

Тепло, внесенное из I зоны с продуктами сгорания во II зону (в расчете на 1 кг топлива):

$$Q_{\text{пс.}}'' = H_{800} \cdot \frac{B_{\text{I}}}{B_{\text{р}}} = 7023,18 \cdot \frac{1,1}{20} = 386,27 \text{ кДж/кг}. \quad (3.32)$$

Тепло, внесенное с сушильным агентом по формуле (3.12):

$$Q_{\text{са}}' = 1,06 \cdot 180 \cdot 1,125 = 214,65 \text{ кДж/кг}.$$

Для твердого топлива принимаем потери теплоты с химическим недожогом $q_3 = 0 \%$, потери теплоты с механическим недожогом $q_4 = 0,5 \%$.

Потери с теплом шлака q_6 , %, определяется по следующей формуле:

$$q_6 = \frac{a_{\text{шл}} \cdot (ct)_{\text{шл}} \cdot A^{\text{р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (3.32)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – то же, что и в формуле (2.34);

$a_{\text{шл}} = 1 - a_{\text{ун}} = 1 - 0,95 = 0,05$ – доля шлакоулавливания в топочной камере;

$a_{\text{ун}} = 0,95$ – доля золы топлива, уносимая газами;

$(ct)_{\text{шл}} = 560 \text{ кДж/кг}$, – энтальпия шлака;
 A^p – зольность топлива, % (см. таблицу 2.1).

$$q_6 = \frac{0,05 \cdot 560 \cdot 7,4}{15280} = 0,01\%.$$

Тогда полное тепловыделение в топке:

$$Q_m = Q_{\text{с}} + Q_{\text{рец}}'' + Q_{\text{са}}'' + Q_{\text{нс}}^I + Q_n^p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_3} = \quad (3.33)$$

$$= 1426,83 + 287,95 + 214,65 + 386,27 + 15280 \cdot \frac{(100 - 0 - 0,5 - 0,01)}{100 - 0,5} = 17594,16 \text{ кДж/кг}$$

Температура на выходе из III зоны (см. тепловой расчет): $\vartheta_{\text{т}}'' = 1135^\circ\text{C}$,
 тогда:

$$H_{\text{т}}'' = 10351,82 \text{ кДж/кг}.$$

Тепло, отданное в топке (II и III зоны):

$$Q_{\text{II-III}} = Q_{\text{т}}'' - H_{\text{т}}'' = 17594,16 - 10351,82 = 7242,34 \text{ кДж/кг}. \quad (3.34)$$

Поверхности стен, ограничивающих II и III зоны: $F_{\text{II-III}} = 1482 \text{ м}^2$.
 Среднее тепловое напряжение стен топки:

$$q_{\text{т}} = \frac{B_{\text{р}}^{\text{II-III}} \cdot Q_{\text{II-III}}}{F_{\text{ст}}} = \frac{18,9 \cdot 7242,34}{796,1} = 171,94 \text{ кДж/м}^2 \text{ с} \quad (3.35)$$

Тепловосприятие части мембранного экрана, включенной в рассчитываемый контур со стороны топки:

$$Q_{\text{т}}^{\text{цк}} = q_{\text{т}} \cdot F_{\text{тп}} \cdot \frac{(x \cdot \xi)_{\text{мембр}}}{(x \cdot \xi)_{\text{стен}}} = 171,94 \cdot 21,2 \cdot \frac{(1 \cdot 0,45)}{(0,96 \cdot 0,45)} = 3797 \text{ кДж/с} \quad (3.36)$$

Полное тепловосприятие части мембранного экрана, входящего в рассчитываемый циркуляционный контур:

$$Q_{\text{конт}} = Q_{\text{пр.т}}^{\text{к}} + Q_{\text{т}}^{\text{цк}} = 271,7 + 3797 = 4068,7 \text{ кДж/с} \quad (3.37)$$

Таблица 3.3 - Сводные данные из теплового расчета котла, подсчет исходных величин

| Наименование величины | Обозначение | Откуда берется | Величина |
|--|-------------------|--|----------|
| Паропроизводительность котла, кг/с | $D_{\text{пе}}$ | Исходные данные | 139 |
| Давление пара в барабане котла, МПа | $P_{\text{б}}$ | Исходные данные | 15,88 |
| Расчетный расход топлива, кг/с | B_p | Исходные данные | 20 |
| Полное тепловосприятие топки, кДж/кг | $Q_{\text{л}}$ | Исходные данные | 7242,34 |
| Энтальпия воды на линии насыщения при давлении в барабане, кДж/кг | h' | [5] | 1644,9 |
| Плотность воды на линии насыщения при давлении в барабане, кг/м ³ | ρ' | [5] | 587,235 |
| Плотность пара при тех же условиях, кг/м ³ | ρ'' | [5] | 105,082 |
| Скрытая теплота парообразования, кДж/кг | r | [5] | 939,676 |
| Температура воды за водяным экономайзером, °С | $t''_{\text{вз}}$ | Исходные данные | 322 |
| Энтальпия воды за водяным экономайзером, кДж/кг | $h''_{\text{вз}}$ | Исходные данные | 1349,18 |
| Среднее удельное тепловосприятие экранов топки, кДж/м ² | $q_{\text{л}}$ | $\frac{B_p \cdot Q_{\text{л}}}{F_{\text{ст}}}$ | 171,94 |
| Поверхность стены, занятая экраном рассчитываемого контура, м ² | $F_{\text{к}}$ | Из расчета | 21,2 |
| Коэффициент неравномерности тепловосприятия по ширине стены топки | $\eta_{\text{ш}}$ | [4, с. 32] | 1,1 |
| Полное тепловосприятие контура, кДж/кг | $Q_{\text{к}}$ | Из расчета | 4068,7 |

Далее зададимся тремя значениями скорости циркуляции и произведем расчет контура циркуляции (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Порядок расчета естественной циркуляции

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина | | |
|---|---|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Скорость циркуляции, W_0 , м/с | Принимаются три значения [4, с. 34] | 0,5 | 1 | 1,5 |
| Расход циркулирующей жидкости, G , кг/с | $W_0 \cdot F_{\text{экp}} \cdot \rho'$ | 18,065 | 36,130 | 54,194 |
| Опускные трубы | | | | |
| Скорость потока в опускных трубах, $W_{\text{оп}}$, м/с | $\frac{G}{F_{\text{оп}} \cdot \rho'}$ | 1,456 | 2,913 | 4,369 |
| Гидравлическое сопротивление опускных труб, $\Delta P_{\text{он}}$, Па | $(\lambda_0^{on} l_{on} + \sum \xi_{\text{пов}}^{on} + \xi_{\text{ex}}^{on} + \xi_{\text{вых}}^{on}) \cdot \frac{W_{\text{оп}}^2 \rho'}{2}$ | 7254,3 | 29017,18 | 65288,66 |
| Подъемные трубы экрана | | | | |
| Кратность циркуляции в котле, K | [4, с. 36] | 8 | 8 | 8 |
| Недогрев до кипения в барабане, Δh_6 , кДж/кг | $\frac{h' - h_{\text{эк}}}{2}$ | 36,97 | 36,97 | 36,97 |
| Количество тепла, необходимого для подогрева воды до кипения, $Q_{\text{эк}}$, кДж/кг | $\Delta h_6 \cdot G$ | 667,77 | 1335,53 | 2003,3 |
| Паропроизводительность паросодержащего участка контура, $D_{\text{к}}$, кг/с | $\frac{Q_{\text{к}} - Q_{\text{эк}}}{r}$ | 3,62 | 2,91 | 2,2 |
| Средняя приведенная скорость пара, W_0'' , м/с | $\frac{0,5 \cdot D_{\text{к}}}{F_{\text{экp}} \cdot \rho'}$ | 0,05 | 0,04 | 0,03 |
| Скорость пара на участке после обогрева (от потолка до сборного коллектора), $W_{\text{опо}}''$, м/с | $\frac{D_{\text{к}}}{F_{\text{экp}} \cdot \rho''}$ | 0,55 | 0,45 | 0,34 |
| Средняя скорость смеси в обогреваемых трубах, $\bar{W}_{\text{см}}$, м/с | $W_0 + W_0'' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)$ | 0,541 | 1,033 | 1,525 |
| Скорость смеси в участке после обогрева, $W_{\text{см.по}}$, м/с | $W_0 + W_{\text{опо}}'' \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)$ | 0,95 | 1,37 | 1,78 |
| Среднее объемное паросодержание в обогреваемой части, $\bar{\beta}$ | $\frac{W_0''}{\bar{W}_{\text{см}}}$ | 0,09 | 0,04 | 0,02 |

Продолжение таблицы 3.4

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина | | |
|---|--|----------|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Объемное паросодержание в участке после обогрева, β_{no} | $\frac{W''_{опо}}{W_{см.по}}$ | 0,581 | 0,326 | 0,19 |
| Коэффициент пропорциональности на участке после обогрева, C | Принимается по величине $\bar{W}_{см}$ [4, с. 12] | 0,82 | 0,9 | 0,94 |
| Коэффициент пропорциональности на участке после обогрева, C_{no} | Принимается по величине $W_{см.по}$ [4, с. 12] | 0,9 | 0,93 | 0,96 |
| Среднее напорное паросодержание в обогреваемой части, $\bar{\varphi}$ | $C \cdot \bar{\beta}$ | 0,08 | 0,04 | 0,02 |
| Напорное паросодержание в участке после обогрева, φ_{no} | $C_{no} \cdot \beta_{no}$ | 0,52 | 0,3 | 0,18 |
| Высота экономайзерной части контура, $H_{эк}$, м | $H_{до} + \frac{\Delta h_{сн} - \Delta h_{сн} + \frac{\Delta h}{\Delta p} \cdot \rho' \cdot 10^{-4} \cdot \left(H_{он} - H_{до} - \frac{\Delta P_{он}}{10 \rho'} \right)}{\frac{Q_k}{H_{он} G} + \frac{\Delta h}{\Delta p} \cdot \rho' \cdot 10^{-4}}$ где $\Delta h_{сн}$ – определяется по /4, с. 20/; $\Delta h / \Delta p$ – изменение энтальпии воды на линии насыщения при изменении давления воды на 1 МПа [5] | 4,42 | 7,28 | 7,73 |
| Длина экономайзерной части $l_{эк}$, м | Определяется по схеме контура и величине $H_{эк}$ | 5,09 | 8,21 | 9,21 |
| Длина обогреваемой паросодержащей части трубы, $l_{пар.об}$, м | Определяется по схеме контура и величине $H_{эк}$ | 4,91 | 1,79 | 0,79 |
| Длина необогреваемой паросодержащей части трубы (до входа в коллектор), $l_{по}$, м | Определяется по схеме контура и величине $H_{эк}$ | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Суммарный коэффициент сопротивления поворотов в эконо-майзерной части трубы, $\sum \xi_{пов}$ | Количество поворотов определяем по схеме циркуляционного контура. Величины коэффициентов найдены ранее (таблица) | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Суммарный коэффициент сопротивления поворотов в обогреваемой паросодержащей части труб, $\sum \xi_{пов}^{об.пар}$ | Количество поворотов определяем по схеме циркуляционного контура. Величины коэффициентов найдены ранее (таблица) | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

Продолжение таблицы 3.4

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина | | |
|--|---|-------------|-------------|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Суммарный коэффициент сопротивления поворотов в необогреваемой паросодержащей части труб, $\sum \xi_{пов}^{но.пар}$ | Количество поворотов определяем по схеме циркуляционного контура. Величины коэффициентов найдены ранее (таблица) | 0 | 0 | 0 |
| Сопротивление входа в трубы из нижнего коллектора, $\xi_{вх}$ | [4, с. 35] | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| Высота паросодержащей обогреваемой части труб, $H_{пар.об}$, м | По схеме от точки закипания до выхода из топки (за обмуровку) | 4,34 | 1,48 | 1,03 |
| Движущий напор обогреваемой части, $S_{об}$, Па | $\bar{\varphi} \cdot H_{пар.об} \cdot (\rho' - \rho'') \cdot 10$ | 1583,7 | 248,25 | 93,02 |
| Высота паросодержащей необогреваемой части труб, $h_{по}$, м | По схеме от выхода за пределы обмуровки до сборного коллектора | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| Движущий напор необогреваемой части труб, $S_{по}$, Па | $\varphi_{по} \cdot H_{по} \cdot (\rho' - \rho'') \cdot 10$ | 226,46 | 131,47 | 78,83 |
| Полный движущий напор контура, S_k , Па | $S_{об} + S_{по}$ | 1810,1 5 | 380,72 | 171,86 |
| Среднее массовое паросодержание обогреваемой части, \bar{x} | $\frac{0.5 \cdot D_k}{G}$ | 0,1 | 0,04 | 0,02 |
| Массовое паросодержание в участке после обогрева, $x_{по}$ | $\frac{D_k}{G}$ | 0,2 | 0,08 | 0,04 |
| Скоростной напор во входном сечении, Па/м (из нижнего коллектора) | $\frac{W_0^2 \rho'}{2}$ | 73,4 | 293,6 | 660,6 |
| Коэффициент для расчета потери давления на трение, ψ | Определяется по величинам W_0 и P_6 | 1,48 | 1,2 | 1 |
| Потеря давления в экономайзерной части, $\Delta P_{эк}$, Па/м ² | $(\xi_{вх} + \lambda_0^{экp} \cdot l_{эк} + \sum \xi_{пов}^э) \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho'}{2}$, где $\lambda_0^{экp}$ – приведенный коэффициент трения экранных труб [4, с. 10] | 261,58 | 1183,7 2 | 2762,4 6 |

Продолжение таблицы 3.4

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина | | |
|---|--|----------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Потеря от трения в обогреваемой паросодержащей части $\Delta P_{тр.пар}$, Па/м ² | $\lambda_0^{экр} \cdot l_{пар.об} \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho'}{2} \left(1 + \psi \cdot \bar{x} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right)$ | 90,42 | 96,11 | 85,49 |
| Потеря от трения в участке после обогрева, $\Delta P_{тр.по}$, Па/м ² | $\lambda_0^{экр} \cdot l_{по} \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho'}{2} \left(1 + \psi \cdot x_{по} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right)$ | 12,91 | 31,67 | 58,66 |
| Потеря давления в поворотах и при выходе из трубы в участке после обогрева, $\Delta P_{по}$, Па/м ² | $(\sum \xi_{пов}^{по.пар} + \xi_{вых}) \frac{W_0^2 \cdot \rho'}{2} \left(1 + \psi \cdot x_{по} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right)$ | 280,22 | 801,66 | 1564,34 |
| Сумма потерь давления, $\sum \Delta P$, Па/м ² | $\Delta P_{эк} + \Delta P_{тр.пар} + \Delta P_{тр.по} + \Delta P_{по}$ | 645,12 | 2113,16 | 4470,95 |
| Полезный напор экрана, $S_{пол}^{экр}$, Па/м ² | $S_k - \sum \Delta P$ | 1165,04 | -1732,4 | -4299 |
| Отводящие трубы экрана (от сборного коллектора до барабана котла) | | | | |
| Скорость пароводяной смеси в пароотводящих трубах, $W_{см.отв}$, м/с | $\frac{W_{см.по} \cdot F_{экр}}{F_{отв}}$ | 2,93 | 4,19 | 5,45 |
| Потери давления от трения в отводящих трубах, $\Delta P_{тр}^{отв}$, Па/м ² | $\lambda_0^{отв} \cdot l_{отв} \cdot \frac{W_0^2 \cdot \rho'}{2} \left(1 + \psi \cdot x_{отв} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right)$ где $\lambda_0^{отв}$ – приведенный коэффициент трения отводящих труб [4, с. 10]; $x_{отв} = x_{по}$ | 877,84 | 2153,59 | 3989,06 |
| Потеря на трение на входе и поворотах, $\Delta P_{м}$, Па/м ² | $(\sum \xi_{пов}^{отв} + \xi_{вх}) \frac{W_0^2 \cdot \rho'}{2} \left(1 + \psi \cdot x_{отв} \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right)$ | 224,17 | 641,33 | 1251,47 |
| Потеря на подъем смеси выше уровня воды в барабане котла, $\Delta P_{вы}$, Па/м ² | $10 \cdot (1 - \varphi_{отв}) \cdot H_{вы} \cdot (\rho' - \rho'')$ где $\varphi_{отв} = \varphi_{по}$ | 0 | 0 | 0 |
| Сумма потерь давления в отводящих трубах, $\sum \Delta P_{отв}$, Па/м ² | $\Delta P_{тр}^{отв} + \Delta P_{м} + \Delta P_{вы}$ | 1102,02 | 2794,92 | 5240,53 |

Окончание таблицы 3.4

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина | | |
|--|--|----------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Движущий напор отводящих труб, $S_{отв}$, Па/м ² | $10 \cdot \varphi_{по} \cdot H_{отв} \cdot (\rho' - \rho'')$ | 60740,55 | 35263,03 | 21144,56 |
| Полезный напор отводящих труб, $S_{пол}^{отв}$, Па/м ² | $S_{отв} - \sum \Delta P_{отв}$ | 59638,53 | 32468,11 | 15904,04 |
| Полезный напор контура, $S_{пол}^к$, Па/м ² | $S_{отв}^{пол} + S_{пол}^{экр}$ | 60803,57 | 30735,68 | 11604,95 |

Далее выполним построение графика зависимости полезного напора контура $S_{пол}^к$ и сопротивления опускаемых труб $\Delta P_{он}$ от скорости циркуляции W_0 (рисунок 26). Пересечение этих двух кривых дает истинное значение скорости циркуляции $W_0 = 1,016$ м/с и полезного напора $S_{пол} = 30142,27$ Па.

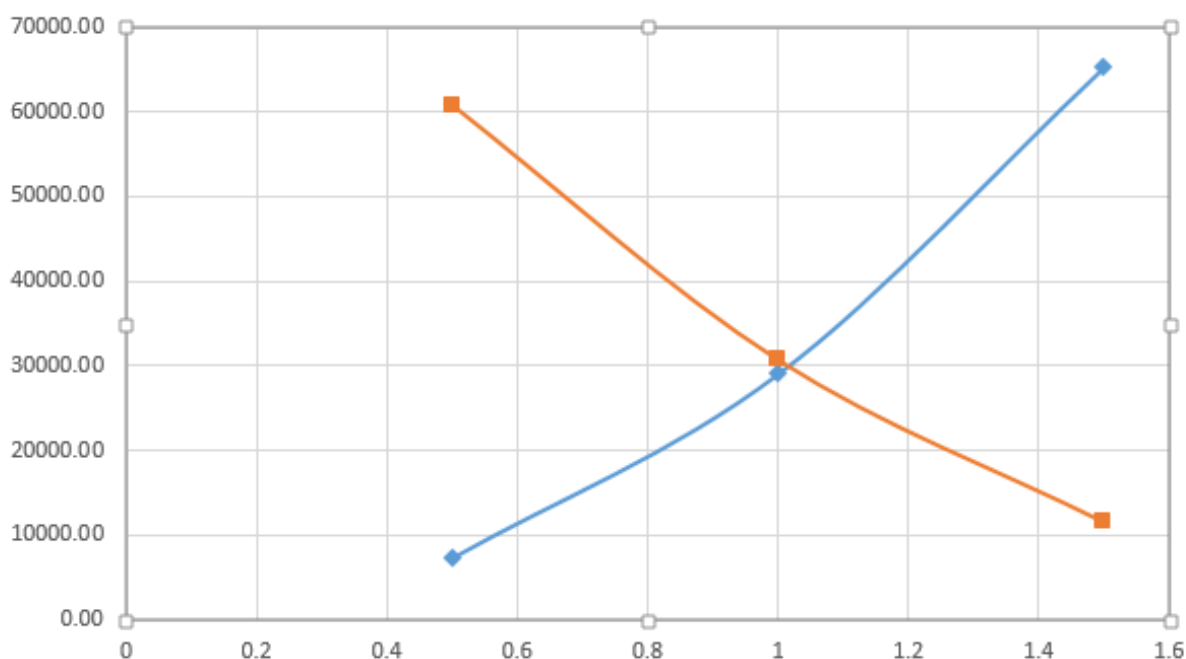


Рисунок 3.4 – Зависимость $S_{пол}^к$ и $\Delta P_{он}$ от W_0

После определения действительного значения скорости циркуляции проверим контур на возможность застоя (таблица 3.4) и опрокидывания циркуляции (таблица 3.5).

Таблица 3.5– Проверка возможности застоя циркуляции

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина |
|---|---|----------|
| Средняя приведенная скорость пара в обогреваемой части, \overline{W}_0'' , м/с | $\frac{0.5 \cdot Q_k}{r \cdot \rho'' \cdot F_{\text{экp}}}$ | 0,332 |
| Приведенная скорость пара в обогреваемой части, $W_{0\text{по}}''$, м/с | $\frac{Q_k}{r \cdot \rho'' \cdot F_{\text{экp}}}$ | 0,663 |
| Коэффициент неравномерности тепловосприятия разверенной трубы, η_m | [4, с. 32] | 1,2 |
| Коэффициент конструктивной нетождественности, η_k | | 1 |
| Средняя приведенная скорость пара в обогреваемой части разверенной трубы, $\overline{W}_{\text{от}}'$, м/с | $\eta_t \cdot \eta_k \cdot \overline{W}_0''$ | 0,398 |
| Конечная приведенная скорость пара в разверенной трубе, $W_{\text{от}}''$, м/с | $\eta_t \cdot \eta_k \cdot \overline{W}_{0\text{по}}''$ | 0,796 |
| Среднее напорное паросодержание застоя в обогреваемой части разверенной трубы, $\overline{\varphi}_3$ | Принимается по величинам \overline{W}_0'' и P_6 [4с. 13] | 0,85 |
| Напорное паросодержание застоя в участке после обогрева развёрнутой трубы, $\varphi_{3\text{по}}$ | Принимается по величинам \overline{W}_0'' и P_6 [4, с. 21] | 0,9 |
| Напор застоя в разверенной трубе, S_3 , Па/см ² | $10 \cdot (H_{\text{об}} \cdot \overline{\varphi}_3 + H_{\text{по}} \cdot \varphi_{3\text{по}}) (\rho' - \rho'')$ | 36216,39 |
| Полезный напор экрана, $S_{\text{пол}}$, Па/м ² | Определен ранее по результату построения графика $\Delta P_{\text{он}}$, $S_{\text{пол}}^k = f(W_0)$ | 30142,27 |
| Коэффициент запаса по застою, $S_3 / S_{\text{пол}}$ | $S_3 / S_{\text{пол}} > 1,1 \text{ (1,2)}$ | 1,2 |

Таблица 3.6 – Проверка на опрокидывание циркуляции

| Наименование величины | Расчетная формула | Величина |
|---|---|----------|
| Средняя приведенная скорость пара при спускном движении в обогреваемой части, $\bar{W}_{0об}''$, м/с | $\bar{W}_{0об}'' = \bar{W}_0''$ | 0,3317 |
| Средняя приведенная скорость пара при спускном движении на участке до обогрева, $\bar{W}_{0до}''$, м/с | $\bar{W}_{0до}'' = W_{0по}''$ | 0,663 |
| Средняя приведенная скорость пара в экране при опускном движении, $\bar{W}_{0э}''$, м/с | $\frac{\bar{W}_{0оо}'' \cdot H_{об} + \bar{W}_{0до}'' \cdot H_{до}}{H_0 - H_{по}}$ | 0,335 |
| Средняя приведенная скорость пара в развернутой трубе при опускном движении, $\bar{W}_{0т}''$, м/с | $\eta_t \cdot \eta_k \cdot \bar{W}_{0эл}''$ | 0,402 |
| Полный коэффициент гидравлического сопротивления труб, Z | $\lambda_0^{экр} \cdot l_{экр} \cdot \sum \xi_m$, где $\lambda_0^{экр}$ – приведенный коэффициент трения экранных труб /4, с. 10/; l_0 – длина труб экрана от нижнего коллектора до верхнего сборного, м; $\sum \xi_m = \sum \xi_{пов}^{экр} + \xi_{вх} + \xi_{вых}$ – сумма местных сопротивлений по всей высоте экранных труб | 4,95 |
| Удельный коэффициент сопротивления экрана, Z/H_0 | | 0,554 |
| Удельный напор опрокидывания циркуляции, $S_{опр}^{уд}$, Па/(см ² ·м) | [4, с. 13] | 5100 |
| Напор опрокидывания в экране, $S_{опр}$, Па/м ² | $S_{опр}^{уд} \cdot (H_0 - H_{по})$ | 45135 |
| Коэффициент запаса по опрокидыванию, $S_{опр} / S_{пол}$ | $S_{опр} / S_{пол} > 1,1(1,2)$ | 1,5 |

Расчет естественной циркуляции показал, что коэффициент запаса по застою $S_z/S_{пол}$ больше 1,1 и коэффициент запаса по опрокидыванию $S_{опр}/S_{пол}$ тоже больше 1,1, что свидетельствует о надежности циркуляции при номинальном режиме.

4 Охрана окружающей среды

Сжигание топлива на тепловых электростанциях и в котельных приводит к выбросу в атмосферу продуктов сгорания органического топлива, содержащих токсичные оксиды азота NO_x (главным образом монооксид азота NO и в меньшей степени диоксид NO₂). Количество образующихся оксидов азота

зависит от характеристики топлива и от конструктивного исполнения топочной камеры, поэтому на стадии проектирования котлов необходимо провести расчет ожидаемых выбросов оксидов азота и предусмотреть меры по снижению их до величин, максимально приближающихся к нормативам удельных выбросов NO_x в атмосферу. В топках при горении топлива образуется 95 - 99% монооксида азота NO и 1 - 5% более токсичного диоксида азота NO_2 [6]. В атмосфере происходит неконтролируемое превращение NO в NO_2 , в связи с чем расчет ведется условно на NO_2 . Для расчета доли диоксида азота в суммарном содержании NO_x в атмосферном воздухе при расчете загазованности и нормировании выбросов ТЭС условно применяется коэффициент 0,8. Источниками оксидов азота являются молекулярный азот воздуха, используемого в качестве окислителя при горении и азотсодержащие компоненты топлива. В связи с этим принято делить оксиды азота на воздушные и топливные. Воздушные, в свою очередь, можно разделить на термические, образующиеся при высоких температурах за счет окисления молекулярного азота атомарным кислородом (механизм Зельдовича), и так называемые "быстрые" оксиды азота, образующиеся в зоне сравнительно низких температур в результате реакции углеводородных радикалов с молекулой азота и последующего взаимодействия атомарного азота с гидроксидом OH . В настоящее время существует несколько методик, позволяющих рассчитать концентрации или массовый выброс оксидов азота для паровых и водогрейных котлов в зависимости от их производительности, вида сжигаемого топлива, режимных и конструктивных условий.

4.1 Расчет выбросов оксидов азота на котле БКЗ-500 с прямоточными горелками

Удельные выбросы оксидов азота K_{NO_2} (г/МДж) складываются из топливных и воздушных оксидов азота:

$$K_{\text{NO}_2} = K_{\text{NO}_2}^{\text{возд.}} + K_{\text{NO}_2}^{\text{топл.}}, \quad (4.1)$$

Воздушные оксиды азота образуются в зоне максимальных температур, то есть там, где поля концентраций, скоростей и температур отдельных горелок уже выровнялись.

$K_{\text{NO}_2}^{\text{возд.}}$ — определяется в зависимости от температуры в ядре факела т.е. температуры в зоне выхода активного горения и коэффициентов избытка воздуха в зоне активного горения.

При $T''_{\text{заг}}$ ниже 1800 К выходом воздушных оксидов азота нужно пренебречь. В остальных случаях необходимо вычислить [6].

Для подсчета $K_{\text{NO}_2}^{\text{возд.}}$ используют зависимость учитывающую известное уравнение Зельдовича:

$$K_{NO2}^{возд.} = \frac{1,54 \cdot 10^{16}}{\sqrt{T_{заг}''}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_{заг}'' - 1}{\alpha_{заг}''}} \cdot \exp\left(\frac{-67000}{T_{заг}''}\right), \quad (4.2)$$

где $\alpha_{заг}''$ – коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения;
 $T_{заг}''$ – температура на выходе из зоны активного горения, К.

$$\alpha_{заг}'' = \alpha_{г} + 0,54\alpha_{т} = 1,15 + 0,5 \cdot 0,05 = 1,175, \quad (4.3)$$

где $\alpha_{г}$ – коэффициент избытка воздуха в горелках ;
 $\Delta\alpha_{т}$ – присосы в топке;

Тогда удельный выброс воздушных оксидов азота, г/МДж, составит:

$$K_{NO2}^{возд.} = \frac{1,54 \cdot 10^{16}}{\sqrt{1861}} \cdot \sqrt{\frac{1,175 - 1}{1,175}} \cdot \exp\left(\frac{-67000}{1861}\right) = 0,0319.$$

Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле:

$$K_{NO2}^{топл.} = 0,7N_t \cdot \beta_{\alpha г} \cdot \beta_{\alpha 1} \cdot \beta_R \cdot \beta_{\theta} \cdot \beta_{см}, \quad (4.4)$$

где N_t – удельное содержание азота в топливе, г/МДж;

$\beta_{\alpha г}$ – влияние коэффициента избытка воздуха в прямооточной горелке;

$\beta_{\alpha 1}$ – влияние доли первичного воздуха в горелке;

β_R – влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух (без учета снижения температуры в зоне активного горения);

β_{θ} – влияние максимальной температуры на участке образования топливных оксидов азота;

$\beta_{см}$ – влияние смесеобразования в корне факела прямооточных горелок;

$$N_t = \frac{10N^p}{Q_H^p} = \frac{10 \cdot 0,6}{15,28} = 0,39 \text{ г/МДж}, \quad (4.5)$$

где N^p – то же, что и в формуле (2.2);

Q_H^p – то же, что и в формуле (2.34).

Влияние коэффициента избытка воздуха в прямооточной горелке:

$$\beta_{\alpha г} = (0,53 \cdot \alpha_{г} + 0,12)^2 = (0,53 \cdot 1,15 + 0,12)^2 = 0,5322, \quad (4.6)$$

где $\alpha_{г}$ – коэффициент избытка воздуха в горелках.

$$\beta_{\alpha 1} = 1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48 = 1,73 \cdot 0,55 + 0,48 = 1,432, \quad (4.7)$$

где α_1 – доля первичного воздуха по отношению к теоретически необходимому.

$$\beta_R = 1 - 0,016\sqrt{R} = 1 - 0,016\sqrt{30} = 0,91, \quad (4.8)$$

где R – степень рециркуляции дымовых газов, %;

$$\beta_{\theta} = 0,113 \cdot \sqrt[3]{T''_{\text{аг}} - 1100} = 0,113 \cdot \sqrt[3]{1861 - 1100} = 1,03, \quad (4.9)$$

где $T''_{\text{аг}}$ – температура за зоной активного горения.

$$\beta_{\text{см}} = 0,98 \cdot \frac{W_2}{W_1} - 0,47 = 0,98 \cdot 1,6 - 0,47 = 1,098, \quad (4.10)$$

где $\frac{W_2}{W_1} = 1,6$ – отношение скоростей вторичного и первичного воздуха в выходном сечении горелок.

Тогда удельный выброс топливных оксидов азота составит, г/МДж:

$$K_{NO_2}^{\text{топл.}} = 0,7 \cdot 0,39 \cdot 0,5322 \cdot 1,432 \cdot 0,91 \cdot 1,03 \cdot 1,098 = 0,214 \text{ г/МДж};$$

$$K_{NO_2} = 0,235 + 0,0319 = 0,246 \text{ г/МДж}.$$

Массовые выбросы азота, г/с:

$$M_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot B = 0,246 \cdot 15,28 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,075. \quad (4.11)$$

Определение объема сухих дымовых газов, м³/кг:

$$V_{\text{сг}} = V_{\text{г}}^0 - V_{H_2O}^0 + (a_{\text{д}} - 1) \cdot 0,984 \quad (4.12)$$

$$V_{\text{сг}} = 4,89 - 0,8 + (1,23 - 1) \cdot 0,984 = 4,32 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Концентрация оксидов азота в перерасчете на NO₂ в сухих продуктах сгорания при стандартных условиях, мг/м³:

$$C_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{V_{\text{сг}}} = 0,267 \cdot \frac{15280}{4,32} = 757 \text{ мг/м}^3 \quad (4.13)$$

Определяем допустимую концентрацию оксидов азота в дымовых газах, мг/м³:

$$\mu_{\text{д}} = n \cdot \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{V_{\text{сг}}} = 0,13 \cdot \frac{15280}{4,32} = 443,39 \quad (4.14)$$

где n – показатель норматива удельного выброса загрязняющего вещества, г/МДж.

Определение объема сухих дымовых газов при $a_{\text{д}} = 1,4$, м³/кг:

$$V_{cr} = 4,89 - 0,8 + (1,4 - 1) \cdot 0,984 = 4,48.$$

Определяем допустимую концентрацию оксидов азота в дымовых газах при $a_d = 1,23$, мг/м³:

$$\mu_d = 0,13 \cdot \frac{15280}{4,32} = 459,8 \text{ мг/м}^3.$$

4.2 Расчет выбросов оксидов азота на котле БКЗ-500 с камерами термоподготовки

$K_{NO_2}^{возд.}$ – определяется в зависимости от температуры в ядре факела т.е. температуры в зоне выхода активного горения и коэффициентов избытка воздуха в зоне активного горения.

Так как $T''_{заг} = 1523 \text{ К} < 1800 \text{ К}$ выходом воздушных оксидов азота нужно пренебречь.

$$K_{NO_2}^{возд.} = 0$$

Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле (4.4).

$$N_t = \frac{10N^p}{Q_H^p} = \frac{10 \cdot 0,6}{15,28} = 0,39,$$

где N^p – то же, что и в формуле (2.2);

Q_H^p – то же, что и в формуле (2.34).

Влияние коэффициента избытка воздуха в горелке:

$$\beta_{\alpha r} = (0,53 \cdot \alpha_r + 0,12)^2 = (0,53 \cdot 1,1 + 0,12)^2 = 0,5.$$

$$\beta_{\alpha 1} = 1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48 = 1,73 \cdot 0,15 + 0,48 = 0,734,$$

где α_1 – то же, что и в формуле (4.7).

$$\beta_R = 1 - 0,016\sqrt{R} = 1 - 0,016\sqrt{4} = 0,968,$$

где R – степень рециркуляции дымовых газов, %;

$$\beta_{\theta} = 0,113 \cdot \sqrt[3]{T''_{аг} - 1100} = 0,113 \cdot \sqrt[3]{1523 - 1100} = 0,848,$$

где $T''_{аг}$ – то же, что и в формуле (4.9).

$\beta_{см}$ – влияние смесеобразования в корне факела, принимаем 1.

Тогда удельный выброс топливных оксидов азота составит, г/МДж:

$$K_{NO_2}^{топл.} = 0,7 \cdot 0,39 \cdot 0,5 \cdot 0,734 \cdot 0,968 \cdot 0,848 \cdot 1 = 0,082 \text{ г/МДж.}$$

$$K_{NO_2} = 0,082 + 0 = 0,082 \text{ г/МДж.}$$

Массовые выбросы азота, г/с:

$$M_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot Q_H^p \cdot B = 0,082 \cdot 15,28 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0,024 \text{ г/с.}$$

Определение объема сухих дымовых газов, м³/кг:

$$V_{сг} = 4,89 - 0,8 + (1,23 - 1) \cdot 0,984 = 4,32 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$C_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot \frac{Q_H^p}{V_{сг}} = 0,082 \cdot \frac{15280}{4,32} = 290 \text{ мг/м}^3.$$

Определяем допустимую концентрацию оксидов азота в дымовых газах при $a_d = 1,4$, мг/м³:

$$\mu_d = n \cdot \frac{Q_H^p}{V_{сг}} = 0,13 \cdot \frac{15280}{4,48} = 443,39 \text{ мг/м}^3.$$

где n – показатель норматива удельного выброса загрязняющего вещества, г/МДж.

Определение объема сухих дымовых газов при $a_d = 1,4$, м³/кг:

$$V_{сг} = 4,89 - 0,8 + (1,4 - 1) \cdot 0,984 = 4,48 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определяем допустимую концентрацию оксидов азота в дымовых газах при $a_d = 1,23$, мг/м³:

$$\mu_d = 0,13 \cdot \frac{15280}{4,32} = 459,8 \text{ мг/м}^3.$$

5 Экономическая часть

5.1 Расчет экологических платежей за выбросы оксида азота на котле с прямоточными горелками

Массовый выброс оксида азота за год, т.:

$$M_{NO_2}^{год} = M_{NO_2}^{год} \cdot t_{раб} = 0,075 \cdot 6400 \cdot \frac{3600}{1000} = 1728 \quad (4.15)$$

где $t_{раб}$ – фактическое время работы котла за год, ч.

Предельно допустимый выброс загрязняющего вещества, т.:

$$M_{NO2}^{норм} = K_{NO2}^{норм} \cdot Q_H^p \cdot B_p \cdot t_{раб}, \quad (4.16)$$

где $K_{NO2}^{норм} = 0,138$ - нормативное значение массового выброса на единицу тепловой энергии, г/МДж .

$$M_{NO2}^{норм} = 0,138 \cdot 15,28 \cdot 20 \cdot 6400 \cdot \frac{3600}{1000} \cdot 10^{-3} = 971,66 \text{ т.}$$

Размер платежей за выбросы оксида азота в атмосферу определяется по формуле, руб.:

$$П = П_n + П_l \quad (4.17)$$

где $П_n$ - плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб.;

$П_l$ - плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов, руб.

Дифференцированная ставка платы за выброс в атмосферу загрязняющего вещества в пределах допустимых нормативов выбросов, руб.:

$$C_n = H_{бн} - K_э, \quad (4.18)$$

где $H_{бн} = 52$ - базовый норматив платы за выброс в атмосферу загрязняющего вещества в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб [7].

$K_э = 1,4$ - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферы для Восточной Сибири [7].

$$C_n = 52 \cdot 1,4 = 72,8.$$

Плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб. определяется по следующему выражению:

$$П_n = C_n \cdot M_{NO2}^{год} = 72,8 \cdot 1728 = 125798,4. \quad (4.19)$$

Плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов, руб.:

$$П_l = C_l \cdot (M_{NO2}^{год} - M_{NO2}^{норм}), \quad (4.20)$$

где $C_{л}$ - дифференцированная ставка платы за выброс загрязняющего вещества в пределах установленного лимита, руб.:

$$C_{л} = H_{бп} \cdot K_9 = 260 \cdot 1,4 = 364,$$

где $H_{бп} = 260$ - базовый норматив платы за выброс в атмосферу 1 т NO_2 в пределах установленного лимита, руб. [7].

$$C_{л} = 260 \cdot 1,4 = 364.$$

Тогда плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов, руб.:

$$П_{л} = 364 \cdot (1728 - 971,66) = 275307,8$$

Размер экологических платежей за выбросы оксида азота в атмосферу на котле с прямоточными горелочными устройствами, руб.:

$$П = 125798,4 + 275307,8 = 401106,2.$$

5.2 Расчет экологических платежей за выбросы оксида азота на котле с камерами термоподготовки

Массовый выброс оксида азота за год, т.:

$$M_{NO_2}^{год} = M_{NO_2}^{год} \cdot t_{раб} = 0,024 \cdot 6400 \cdot \frac{3600}{1000} = 552,96$$

где $t_{раб}$ - фактическое время работы котла за год, ч.

Предельно допустимый выброс загрязняющего вещества, т.:

$$M_{NO_2}^{норм} = 0,138 \cdot 15,28 \cdot 20 \cdot 6400 \cdot \frac{3600}{1000} \cdot 10^{-3} = 971,66$$

где $K_{NO_2}^{норм}$ = то же, что в формуле (4.16).

Дифференцированная ставка платы за выброс в атмосферу загрязняющего вещества в пределах допустимых нормативов выбросов, руб.:

$$C_{н} = 52 \cdot 1,4 = 72,8.$$

Плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в размерах, не превышающих предельно допустимые нормативы выбросов, руб. определяется по следующему выражению:

$$П_{н} = 72,8 \cdot 552,96 = 40255,49$$

Плата за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в пределах установленных лимитов равны 0, т.к. $M_{NO_2}^{год}$ не превышает допустимых значений, руб.:

$$P_{л} = 0.$$

Размер экологических платежей за выбросы оксида азота в атмосферу на котле с камерами термоподготовки, руб.:

$$П = 40255,49 + 0 = 40255,49.$$

5.3 Оценка экономической эффективности капитальных вложений

Так как увеличилась паропроизводительность котла за счет снижения шлакования на 50 т/ч (достигла номинальной 500 т/ч) и снизились экологические платежи, произведём оценку экономической эффективности капитальных вложений в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Оценка экономической эффективности капитальных вложений

| Показатель | Значение показателя по годам расчетного периода | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Капитальные затраты, тыс. руб. | -4780 | | | | | | | | | | |
| Прирост дохода, тыс. руб. | | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 | 2120 |
| Годовой прирост балансовой прибыли $ДП_{бт} = D_t - DU_{сум}$, тыс. руб. | | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 | 1799,74 |
| 4. Годовой прирост чистой прибыли. | | 1439,792 | 1439,792 | 1439,79 | 1439,79 | 1439,792 | 1439,79 | 1439,79 | 1439,79 | 1439,79 | 1439,79 |
| 5. Амортизационные отчисления $DU_{ам}$, тыс. руб. | | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 | 320,26 |
| 6. ЧДП, руб. | -4780 | 1760,052 | 1760,052 | 1760,05 | 1760,05 | 1760,052 | 1760,05 | 1760,05 | 1760,05 | 1760,05 | 1760,05 |
| 7. ЧДПНИ | | -3019,948 | -1259,896 | 500,156 | 2260,21 | 4020,26 | 5780,31 | 7540,36 | 9300,42 | 11060,5 | 12820,5 |

Окончание таблицы 5.1

| | | | | | | | | | | | |
|----------|--|----------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 8. ДДП | | 1466.71 | 1222.258 | 1018.55 | 848.791 | 707.3254 | 589.438 | 491.198 | 409.332 | 341.11 | 284.258 |
| 9. ДДПНИ | | -3313.29 | -2091.031 | -1072.5 | -223.69 | 483.6328 | 1073.07 | 1564.27 | 1973.6 | 2314.71 | 2598.97 |
| 10. NPV | | 2598 | | | | | | | | | |
| 11. IRR | | 34.99% | | | | | | | | | |
| 12. DPI | | 1.549 | | | | | | | | | |
| 13. PP | | 2.71 | | | | | | | | | |
| 14. DPP | | 4.31 | | | | | | | | | |

По результатам расчета, период окупаемости инвестиционного проекта равен 2,71 года. Проект эффективен, вкладывать инвестиции целесообразно.

6 Безопасность проектируемого объекта

Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 №116-ФЗ, Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.99 г. №52-ФЗ, Закон Российской Федерации "Об охране окружающей среды" от 10.01.02 г. №7-ФЗ (с изменениями на 29.12.15). Данные законы диктуют политику в области экологической и промышленной безопасности и предусматривают оценку опасностей, а так же задают концепцию безаварийной эксплуатации основного и вспомогательного оборудования промышленных объектов.

Опасные ситуации на производстве, где человек находится в опасной зоне, вызваны совокупностью причин, обуславливающих воздействие вредных и опасных факторов на жизнь и здоровье человека.

6.1 Общая характеристика проектируемого объекта с точки зрения безопасности и безвредных условий труда

Процесс производства тепловой и электрической энергии на тепловых электростанциях отличается повышенной опасностью. Большое количество

оборудования, такого как трубопроводы, теплообменники, котло- и турбоагрегаты работают при значительных температурах и давлениях. Тягодутьевые механизмы, насосы, генераторы и углеразмольное оборудование работают при высоких напряжениях, а так же испытывают на себе высокие механические нагрузки. В связи с этим требуется строжайшее соблюдение правил технической безопасности и охраны труда при эксплуатации оборудования ТЭС.

Безопасность проведения испытаний и наладки оборудования обеспечивается в соответствии с ГОСТ 31177-2003, РД 34.03.201-97.

На период отладки и испытаний выполняется временное ограждение, опасные зоны должны быть ограждены.

На вентилях и задвижках отключающей арматуры следует вывешивать плакаты и знаки безопасности «Не открывать - работают люди»; на вентилях открытых дренажей - «Не закрывать - работают люди»; на ключах управления электроприводами отключающей арматуры - «Не включать - работают люди»; на месте работы - «Работать здесь!».

Персонал, участвующий в ремонте и обслуживании, должен быть обеспечен соответствующими средствами защиты.

Необходимо обеспечивать пожаробезопасность, надежность системы маслоснабжения, резервные и аварийные маслоснасосы необходимо проверять в работе не реже двух раз в месяц.

6.2 Микроклимат производственных помещений

Турбинный цех характеризуется повышенным тепловым излучением, повышенной влажностью, высоким уровнем шума, что не обеспечивает благоприятные условия для работы эксплуатирующего персонала. Для обеспечения благоприятного микроклимата в соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96, предусмотрено следующее:

- герметизация технологического оборудования;
- вентиляции помещения по СНиП 41-01-03;
- установка систем местных отсосов, для удаления вредных, пожароопасных и взрывоопасных веществ от мест их образования и выделения;
- установку системы воздушного отопления, совмещенной с вентиляцией.

Таблица 7.1 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

| Период года | Категория работ по уровню эн/затрат | Температура воздуха, °С | Температура поверхности, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный | Па | 19÷21 | 18÷22 | 60÷40 | 0,2 |
| Теплый | Паа | 20÷22 | 19÷23 | 60÷40 | 0,2 |

Таблица 7.2 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

| Период года | Категория работ по уровню эн/затрат, Вт | Температура воздуха, °С | Температура поверхности, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|---|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный | Па | 17÷23 | 16÷24 | 15÷75 | 0,1÷0,4 |
| Теплый | Паа | 18÷27 | 17÷28 | 15÷75 | 0,1÷0,4 |

6.3 Освещение

В котельном цехе предусматривается совместное освещение в соответствии со СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение»:

- естественное, через боковые проемы;
- искусственное; система комбинированная.

Источники освещения: лампы накаливания, лампы газоразрядные.

Предусмотренное освещение разделяется на виды:

- рабочее, в соответствии с характером выполняемых работ;
- аварийное - запитанное от независимого источника энергии;
- дежурное;
- эвакуационное - по основным проходам и лестничным клеткам.

6.4 Шум, ультразвук и инфразвук

Согласно СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» приводим допустимые уровни шума в октавных полосах в производственных помещениях.

Максимально допустимые уровни звукового давления представлены в таблице 7.3.

Снижение вредного воздействия шума на человека в производственных условиях достигается по ГОСТ 12.1.003. ССБТ «Шум. Общие требования безопасности»:

- рациональное размещение;

- звукоизоляцию;
- звукопоглощающую облицовку;
- индивидуальные средства защиты (наушники, беруши и т.д.);
- строительно-акустические мероприятия;

Таблица 7.3 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для рабочих мест в производственном помещении турбинного цеха

| Назначение помещений или территорий | Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц | | | | | | | | | Уровни звука и эквивалентные уровни звука(в ДВА) |
|---|--|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|--|
| | 31,5 | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| Рабочие помещения диспетчерских служб, кабины наблюдения и дистанционного управления с речевой связью | 96 | 83 | 74 | 68 | 63 | 60 | 57 | 55 | 54 | 65 |
| Выполнение всех видов работ на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий. | 107 | 95 | 87 | 82 | 78 | 75 | 73 | 71 | 69 | 80 |

6.5 Вибрация

Источниками вибрации в котельном цехе являются:

- котлоагрегаты;
- насосы;
- электродвигатели;
- вспомогательное оборудование.

Для снижения вредного воздействия вибрации на персонал применяются следующие мероприятия по ГОСТ 12.1.012-03.ССБТ «Вибрационная безопасность. Общие требования»:

- снижение вибрации в источнике ее образования конструктивными или технологическими мерами;

- уменьшение вибрации на пути ее распространения средствами виброизоляции и вибропоглощения;
- дистанционное управление;
- средства индивидуальной защиты;
- организационные мероприятия (рациональные режимы труда и отдыха, лечебно-профилактические и другие мероприятия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты топочной камеры котла БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2, оборудованной системой термоподготовки, при газовой сушке угольной пыли

Применение пылеугольных камер термической подготовки, расположенных по углам топочной камеры котла Е-500, позволяет при избытках воздуха $\alpha \ll 1$ осуществлять термическую деструкцию пылеугольного потока. Часть топлива сгорает, обеспечивая температуру в камере термоподготовки около 800°C. Это дает возможность в 2-3 раза снизить выбросы оксидов азота. Так же, за счет более длительного процесса воспламенения топлива происходит более глубокое выгорание, следовательно уменьшается шлакование и загрязнение поверхностей нагрева котлоагрегата.

В результате гидравлического расчета было установлено, что в контуре циркуляции, образованном мембранными поверхностями нагрева будет отсутствовать застой и опрокидывание циркуляции.

Проведена оценка экономической эффективности. По результатам расчета, период окупаемости инвестиционного проекта равен 2,71 года. Проект эффективен, вкладывать инвестиции целесообразно.

Таким образом установлено, что применение термической подготовки топлива позволяет создать высокoeкономичный экологически чистый котельный агрегат. Внедрение таких котлов позволит решить одновременно вопросы энергосбережения, экологии и экономичности работы тепловых электростанций.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дубровский, В. А. Повышение эффективности энергетического использования углей Канско-Ачинского бассейна : Монография / В. А. Дубровский. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. – 184 с.
2. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы (тепловой расчет парового котла) : Учебное пособие / Е. А. Бойко, И. С. Деринг, Т. И. Охорзина. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 96 с.
3. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы (аэродинамический расчет котельных установок) : Учебное пособие / Е. А. Бойко, И. С. Деринг, Т. И. Охорзина. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 71 с.
4. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы (расчет естественной циркуляции в контурах барабанных котлов) : Учебное пособие / Е. А. Бойко, И. С. Деринг, Т. И. Охорзина. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 47 с.
5. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М. : Энергия, 1980. – 425 с.
6. Росляков, П. В. Расчет вредных выбросов ТЭС в атмосферу : Учебное пособие, 2-е изд. испр. и доп. / Под ред. П. В. Рослякова. – М. : Издательство МЭИ, 2002. – 84с.
7. О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления [Электронный ресурс] : постановление Правительства РФ от 12.06.2003 N 344. // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – Режим доступа : <http://www.consultant.ru>.
8. СТО 4.2–07–2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. Введен взамен СТО 4.2–07–2012. Дата введения 30 декабря 2013 года. Красноярск ИПК СФУ, 2014. 60с.